PHYSIKALISCHE ZEITSCHRIFT

vereinigt mit dem

JAHRBUCH DER RADIOAKTIVITÄT UND ELEKTRONIK

Nr. 18 — 15. September 1931 — 32. Jahrgang

Redaktionsschluß für Nr. 20 am 1. Oktober 1931.

INHALT:

Originalmitteilungen:

R. Möller, Die Kerrkonstante des Nitrobenzols. S. 697.

F. Hehlgans, Beiträge zur Physik der Nitrobenzolkerrzelle. I. S. 718.

H. Kühlewein und H. Neumann, Eine Apparatur für ballistische Ringmessungen bei höheren Temperaturen. S. 727.

E. Nähring, Reflexion der Röntgenstrahlen an dünnen Schichten. S. 730.

R. Hilsch und R. W. Pohl, Vorführungsversuche über die Lichtabsorption in einfachen Kristallen. S. 734.

Besprechungen:

R. Beyer, Technische Kinematik. S. 736.

F. Baldet, La constitution des comètes. S. 736.

Tagesereignisse. S. 736.

Personalien. S. 736.

ORIGINALMITTEILUNGEN.

Die Kerrkonstante des Nitrobenzols.

Von R. Möller.

Inhaltsübersicht.

	Seite
I. Rückblick auf die bisher über das gleiche Thema veröffentlichten Arbeiten	697
II. Aufgabenstellung	699
III. Vorversuche	699
a) Reinigung des Nitrobenzols	700
b) Leitfähigkeitsmessungen	701
IV. Versuchsanordnung	702
1. Zellenkonstruktionen	702
2. Kondensatorplattenanordnung	703
3. Optische Versuchsanordnung	703
4. Elektrische Versuchsanordnung	704
5. Temperaturmessung	704
V. Meßmethoden zur Bestimmung der Kerrkonstanten	704
1. Einfache Messungen ohne Berücksichtigung des Feldverlaufes	704
2. Bestimmung des Feldverlaufes	705
a) Photographische Methode	705
b) Spaltverschiebungsmethode	705
c) Streifenmethode	706
VI. Meßergebnisse und Auswertung	706
1. Einfache Messungen	706
2. Feldverteilungskurven	707
3. Spannungsverteilungskurven	709
a) Spaltverschiebungsmethode	709
b) Streifenmethode	711
4. Fehlerdiskussion	714
VII. Diskussion der Resultate	714
1. Größe der Kerrkonstante	714
2. Art der Verunreinigung	715
VIII. Zusammenfassung	717
IX. Literaturverzeichnis	718

I. Rückblick auf die bisher über das gleiche Thema veröffentlichten Arbeiten.

Stoffe, die den Kerreffekt zeigen, nehmen unter der Einwirkung eines elektrischen Feldes die Eigenschaften eines einachsigen Kristalls an, wobei die optische Achse mit der Richtung der elektrischen Kraftlinien zusammenfällt. Zwei polarisierte Lichtstrahlen, die beim Eintritt in ein solches Medium in Phase liegen, wobei die Schwingungsebene des ersten parallel zu den Kraftlinien, die des zweiten, senkrecht zu den Kraftlinien orientiert ist, zeigen nach dem Austritt einen Gangunterschied von

$$\Delta = B l \mathfrak{E}^2. \qquad (1)$$

In diesem von Kerr (1)[1]), gefundenen Gesetz ist die elektrische Feldstärke $\mathfrak{E}$ in elst. Einh., Δ in Wellenlängen und l (die Strecke, auf welcher die Lichtstrahlen der Einwirkung des elektrischen Feldes unterworfen wurden) in Zentimeter zu messen. B, die Kerrkonstante, ist eine für jeden Körper charakteristische Größe von der Dimension $t^{-2} m^{-1}$.

Um experimentell die Kerrkonstante

$$B = \frac{\Delta}{l \mathfrak{E}^2} \qquad (2)$$

eines Stoffes zu bestimmen, ist also im Prinzip nichts weiter nötig, als bei gegebenem l den Gangunterschied zu messen, der bei einer bestimmten Feldstärke erreicht wird.

1) Literaturverzeichnis am Schluß. S. 718.

In Fig. 1 ist eine derartige Versuchsanordnung schematisch dargestellt. Das von der Lichtquelle L ausgestrahlte Lichtbüschel fällt nacheinander durch den Polarisatornikol N_1, die Kerrzelle Z, ein Kompensationssystem K (z. B. ein Babinetscher Kompensator), ein Halbschattensystem H (z. B. nach Leiser (2)) und den Analysatornikol N_2. Der Nikol N_1 wird senkrecht zu N_2 gestellt und außerdem so orientiert, daß die Schwingungsebene des auf die Kerrzelle fallenden Lichtes einen Winkel von 45^0 mit den elektrischen Kraftlinien bildet. Die Metallplatten der Kerrzelle Z befinden sich in der zu untersuchenden Flüssigkeit.

Das auf die Kerrzelle fallende polarisierte Lichtbüschel kann man sich zerlegt denken in zwei Komponenten, die parallel und senkrecht zum elektrischen Feld stehen und gleiche Amplitude haben. Der nach dem Durchgang durch die Kerrzelle zwischen diesen beiden Komponenten bestehende Gangunterschied wird durch K kompensiert. Das Halbschattensystem dient zur Einstellung auf exakte Kompensation. Unter der Voraussetzung, daß die Feldstärke im Raum zwischen den Kondensatorplatten konstant ist, nimmt das Kerrsche Gesetz die Form an:

$$B = \frac{\Delta}{l}\left(\frac{a}{E}\right)^2. \qquad (3)$$

Nach einer von Des Coudres (3) angegebenen sog. Kompensationsmethode wird der Kompensator K (in Fig. 1) durch eine zweite Kerrzelle

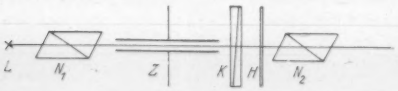


Fig. 1.

ersetzt, deren Kondensatorplatten senkrecht zu denen der ersten Zelle stehen, aber an derselben Spannungsquelle (Gleich- oder Wechselstrom beliebiger Kurvenform) liegen.

Unter den Flüssigkeiten, die den Kerreffekt zeigen, interessiert das Nitrobenzol insofern, als es, soweit bis jetzt bekannt, die größte Kerrkonstante besitzt. In der Tab. I und der Fig. 2 ist eine kurze Übersicht über die bisherigen Bestimmungen derselben gegeben.

Die Werte der Tab. I sind, soweit Angaben vorliegen, auf $t = 20^0$ C und $\lambda = 546\ \mu\mu$ reduziert. Bei der Umrechnung der Werte, die mit der Kompensationsmethode erhalten wurden, ist für Schwefelkohlenstoff ein Wert von $B = 3{,}56 \cdot 10^{-7}$ für $t = 20^0$ C und $\lambda = 546\ \mu\mu$

Tabelle I.

1. Schmidt (4)	$B = 2{,}17 \cdot 10^{-5}$	Kompensationsmethode
2. Mc Comb (5)	$B = 2{,}87 \cdot 10^{-5}$	Absolute Bestimmung
3. Leiser (2)	$B = 3{,}66 \cdot 10^{-5}$	Kompensationsmethode
4. Cotton u. Mouton (6)	$B = 3{,}61 \cdot 10^{-5}$	Kompensationsmethode
5. Lippmann (7)	$B = 4{,}05 \cdot 10^{-5}$	Kompensationsmethode
6. Lyon (8)	$B \approx 3{,}80 \cdot 10^{-5}$	Kompensationsmethode
7. Szivessy (9)	$B = 2{,}83 \cdot 10^{-5}$	Absolute Bestimmung
8. Ilberg (10)	$B = 2{,}49 \cdot 10^{-5}$	Absolute Bestimmung
	elst. cgs. Einheiten	

angenommen. Derselbe ist nach den Messungen von Chaumont (11) und Lyon (8) auf $\pm\ ^1/_2$ Proz.

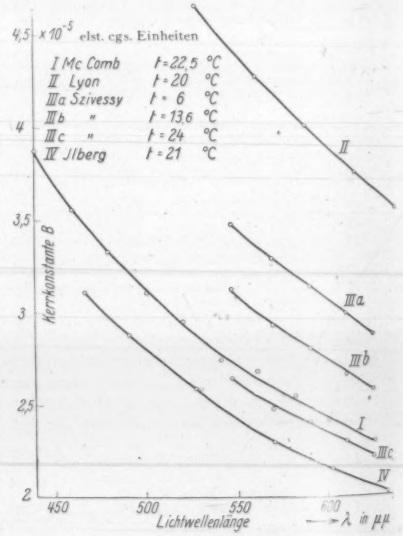


Fig. 2.

genau. Lyon gibt in seiner Arbeit (8) einen zu großen Wert ($B = 4{,}4$) an, da keine Randfeldkorrektion angebracht wurde.

Die Werte streuen derartig, daß sie nicht durch ungenaue Bestimmung von E, a, Δ und l erklärt werden können.

Es erschien daher wünschenswert, zu ermitteln, welche Versuchsbedingungen für eine exakte und reproduzierbare Bestimmung der Kerrkonstante eingehalten werden müssen.

Wie man aus Fig. 2 erkennt, ist die Wellenlängenabhängigkeit (Dispersion) der Kerrkonstanten verschiedentlich mit genügender Genauigkeit bestimmt worden. Infolgedessen wurde bei der vorliegenden Arbeit davon abgesehen, die Dispersion des Kerreffekts nochmals zu prüfen und die Messungen nur bei einer Wellenlänge, nämlich der grünen Quecksilberlinie ($\lambda = 546{,}1\ \mu\mu$) durchgeführt.

Ähnlich liegen die Verhältnisse bei der Temperaturabhängigkeit der Kerrkonstante. In folgender Tabelle ist die Verkleinerung der Kerrkonstante pro °C in Proz. angegeben:

		Proz./° C
Leiser (2)	1,6	
Cotton u. Mouton (6) in der Nähe von 20 ° C	1,5	
Bergholm (12) zwischen 10 und 20° C	1,63	
„ 20 und 30° C	1,3	
Szivessy (9) „ 6,3 und 25,5° C	1,65	

Der letzte Wert erscheint am zuverlässigsten und ist in der vorliegenden Arbeit benutzt worden.

Wenn man von den Messungen von Schmidt und Ilberg absieht, fällt auf, daß die Werte, die bei Wechselstrom (Kompensationsmethode) erhalten wurden, höher liegen, als die Werte, die bei absoluter Bestimmung mit Gleichstrom gefunden wurden. Das läßt darauf schließen, daß die Annahme von $\mathfrak{E} = \frac{E}{a}$ unzutreffend ist.

Nun hat schon Leiser (2) aus der zeitlichen Veränderung der Kerrkonstante von Schwefelkohlenstoff geschlossen, daß der anfangs lineare Potentialabfall zwischen den Elektroden sich so ändert, daß nach einiger Zeit in der Nähe der Elektroden die höchste Feldstärke herrscht, während sie in dem mittleren Raum (in dem gemessen würde) einen Minimalwert besitzt. Später hat Lohaus (13) festgestellt, daß bei Anlegen einer Gleichspannung die Aufhellung nicht gleichmäßig war, sondern in der Nähe der Elektroden größere Werte erreichte. Die Messungen von Ilberg (10) bestätigten dies, waren aber insofern nicht eindeutig, als der Punkt der höchsten Feldstärke einmal an der Anode, ein anderes Mal an der Kathode lag. Bei seinen späteren Versuchen benutzte Ilberg Wechselstrom und stellte fest, daß hierbei eine gleichmäßige Aufhellung des ganzen Gesichtsfeldes eintritt. Insofern kommt den mit der Kompensationsmethode gemessenen Werten eine größere Genauigkeit zu.

Da Schmidt nur Lösungen von Nitrobenzol in Schwefelkohlenstoff untersucht, dann auf den Wert für reines Nitrobenzol extrapoliert hat und außerdem jede Temperaturangabe fehlt, ist der Wert sehr unsicher. Einzig der sehr niedrige Wert von Ilberg ist überraschend, doch ist anzunehmen, daß die gemessenen Temperaturen nicht mit der wahren Temperatur des Nitrobenzols im Kondensatorzwischenraum zusammenfallen, weil eine wesentliche Erwärmung als nicht ausgeschlossen anzusehen ist wegen der gegenüber Gleichstrom sehr großen Leitfähigkeit von etwa $3 \cdot 10^{-7}\ \Omega^{-1}\ \mathrm{cm}^{-1}$ und den hohen Feldstärken (15000 Volt/cm).

Bei sämtlichen Autoren finden sich stark voneinander abweichende Angaben über die Güte der Reinheit und Reinigungsmethoden des Nitrobenzols. Da festgestellt wurde, daß auch bei anderen Stoffen, z. B. Schwefelkohlenstoff (8) und Cumol (7) die Kerrkonstante von dem Reinheitsgrad der Substanz abhängt, kann man sich teilweise auch aus diesem Grunde die großen Abweichungen in den Werten für die Kerrkonstante erklären.

II. Aufgabenstellung.

Da in der Technik die Kerrzelle immer unter Anlegen einer konstanten Gleichstromvorspannung benutzt wird, erschien es wünschenswert, unter diesen Bedingungen das Verhalten des Nitrobenzols im elektrischen Feld zu untersuchen und auf dieser Grundlage die Kerrkonstante zu bestimmen. Die Anwendung einer Gleichspannung bietet außerdem noch insofern Vorteile; als die Leitfähigkeit eine sehr geringe und damit die Gefahr einer Erwärmung sehr herabgesetzt ist und man einen Einblick in den Mechanismus der Stromleitung im Nitrobenzol gewinnen kann.

Hieraus und aus früheren Überlegungen ergaben sich folgende Richtlinien für die Durchführung vorliegender Arbeit:

1. Es mußte ein Nitrobenzol von größter Reinheit (geringste Leitfähigkeit) hergestellt werden.

2. Bei konstanter anliegender Gleichspannung war die Verteilung der Feldstärke im Raum zwischen den Kondensatorplatten zu bestimmen;

3. sollte untersucht werden, ob

a) die Feldverteilung und die Kerrkonstante von der Reinheit des Nitrobenzols abhängen,

b) zwischen Feldverteilung und Kerrkonstante eine Beziehung besteht;

4. war eine exakte Temperaturbestimmung vorzunehmen.

III. Vorversuche[1]).

Bei den ersten Versuchen bestanden die Kondensatorplatten aus Messingschienen, deren Abstand durch Elfenbeinstückchen fixiert wurde. Sie waren in einem nach oben geöffneten Messingtrog untergebracht, der mit Nitrobenzol gefüllt

1) Siehe auch die Veröffentlichung des Verfassers, Physik. Zeitschr. **30**, 20, 1929.

war und auf dessen beiden Längsseiten Glasplatten aufgekittet wurden. Die ersten Versuche mit technischem Nitrobenzol schlugen, auch nach Destillation desselben, vollständig fehl. Schon nach kurzzeitigem Anlegen der Spannung trat eine derartige Schlierenbildung im Gesichtsfeld zwischen den Kondensatorplatten ein, daß jede Beobachtung unmöglich war. Die Verwendung des reinsten käuflichen Nitrobenzolpräparates brachte anfangs wohl etwas Erfolg, doch lagen nach einigen Stunden die Verhältnisse ähnlich wie bei den ersten Versuchen.

a) Reinigung des Nitrobenzols.

Die verhältnismäßig gute Leitfähigkeit war sehr wahrscheinlich auf Aufnahme von Luftfeuchtigkeit zurückzuführen, da Nitrobenzol hygroskopisch ist. Um das Nitrobenzol möglichst gut zu trocknen, wurde während mehrerer Stunden Luft, die durch Kaliumhydroxyd und Phosphorpentoxyd sorgfältig getrocknet war, durch das Nitrobenzol geblasen. Die Leitfähigkeit des Nitrobenzols war jetzt zwar während mehrerer Tage konstant, doch immerhin noch so groß, daß sie den Anforderungen nicht genügte. Daher wurde außerdem eine Destillation des Nitrobenzols unter vermindertem Druck vorgenommen und während des ganzen Destillationsprozesses die Zellenanordnung dauernd an der Pumpe belassen, um evtl. Wasserdampfreste abzupumpen. Die mit derart gereinigtem Nitrobenzol angestellten Versuche brachten zwar Fortschritte, doch stellten die verfeinerte Meßapparatur und die Anwendung höherer Feldstärken gesteigerte Anforderungen. Das Einbringen von stark hygroskopischen Substanzen in Nitrobenzol vor oder während der Destillation führten zu keinem wesentlichen Erfolg.

Wie sich während der Versuche zeigte, fließt durch die Kerrzelle im Moment des Anlegens einer Gleichspannung ein verhältnismäßig hoher Strom, der langsam absinkt. Da diese Selbstreinigung in der Kerrzelle insofern nicht wünschenswert war, als die Verunreinigungen an den Elektroden haften blieben und eventuell zurückdiffundieren konnten, wurden sogenannte Elektrolysiergefäße nach jedem Destillationsprozeß eingeschaltet, in denen sich durch eine Vorelektrolyse ein Teil der Verunreinigungen abscheiden sollte. Die Elektrolysiergefäße bestanden aus doppelwandigen Gefäßen, auf deren Innenflächen zwei Elektroden aus chemisch niedergeschlagenem Silber aufgebracht wurden. Wie sich während der Durchführung der späteren Messungen ergab, wurde zwar der Einschaltstromstoß herabgesetzt, doch mußte auf eine immer noch nicht beseitigte Verunreinigung durch Säuren geschlossen werden. Aus diesem Grunde wurde schließlich das Nitrobenzol mit Silberoxyd versetzt.

Die endgültige Ausführung der gesamten Destillationsapparatur ist in Fig. 3 dargestellt. Die gesamte Glasapparatur wird zunächst mehrfach mit absolutem Alkohol ausgespült und durch Durchleiten vollkommen wasserdampffreier Luft getrocknet. Das mit Silberoxyd versetzte Nitrobenzol ist dann in das Vorratsgefäß V_1 einzufüllen,

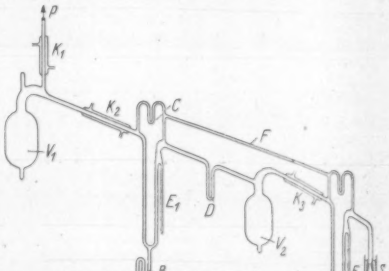


Fig. 3.

nachdem vorher bei Z die Kerrzelle und bei P die Quecksilberpumpe angeschmolzen worden ist. Ist nach längerem Pumpen sämtliche Luft aus dem Nitrobenzol entwichen und sind etwa noch vorhandene Alkoholreste abgepumpt, so wird durch Erwärmen mittels eines Wasserbades vorsichtig — um Siedeverzug zu vermeiden — mit der Destillation begonnen. Nach dem Abpumpen des ersten Destillats wurde der Wasserkühler K_1 in Betrieb genommen und die durch den Kühler K_2 kondensierten Flüssigkeitsmengen in den Bogen B und C durch flüssige Luft ausgefroren. Das Anbringen solcher U-förmigen Bogen bot die einzige Möglichkeit, das Nitrobenzol abzusperren, da sämtliche Fette, die zum Dichten von Hähnen verwandt werden, vom Nitrolbenzol gelöst werden. Hat das Nitrobenzol das Elektrolysiergefäß E_1 angefüllt, so wird es bei B aufgetaut und in das Gefäß G abgelassen. Das nochmalige Ausfrieren bei B verhindert nun eine Rückdiffusion der in G befindlichen Verunreinigungen. Darauf wird an die Elektroden von E_1 eine Gleichspannung gelegt und, nachdem eine genügende Menge Nitrobenzol in das Vorratsgefäß V_2 destilliert ist, bei D ausgefroren. Bei der Destillation aus dem Gefäß V_2 in die Kerrzelle Z wiederholt sich derselbe Vorgang. Es war zweckmäßig, um ein mühe-

losen Füllen einer neuen Zelle zu ermöglichen, eine Quecksilberdichtung S (ungefetteter Schliff) einzuschalten. Um vor dem Anschmelzen einer weiteren Zelle an den Schliff Luft in die Destillationsapparatur zu lassen, war das Verbindungsrohr F vorgesehen.

Einige Füllungen waren unbrauchbar, da das Nitrobenzol eine bräunliche Färbung zeigte. Schließlich stellte sich heraus, daß dieselbe durch einen kleinen Hochfrequenzapparat (Pansanitor), mit dem das Vakuum geprüft wurde, hervorgerufen war.

b) Leitfähigkeitsmessungen.

Bei den späteren Versuchen wurde gefunden, daß die Kerrkonstante und in noch viel größerem Maße die Feldverteilung von der Reinheit (im folgenden immer durch die Leitfähigkeit definiert) des Nitrobenzols abhing, wobei sich auch bei ein und demselben Nitrobenzol die Feldverteilung während eines Versuches änderte.

Um diese Verhältnisse zu klären, wurden im Verlauf der Untersuchungen umfangreiche Leitfähigkeitsmessungen angestellt, die im folgenden zusammengestellt sind.

In Fig. 4 sind Stromspannungskurven eines Nitrobenzols wiedergegeben, das mit Silberoxyd und Vorelektrolyse destilliert worden war. Man

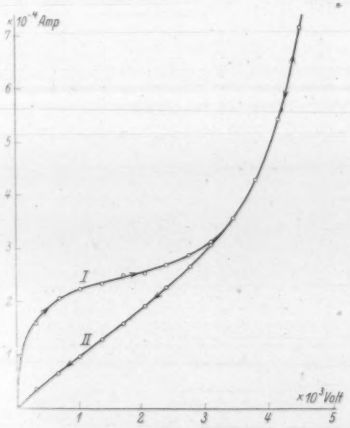


Fig. 4.

sieht, daß die Selbstreinigung eine verhältnismäßig lange Zeit und eine gewisse Feldstärke benötigt. Erst bei 3500 Volt (70000 Volt/cm) ist ein stationärer Zustand eingetreten. Wurde Kurve II langsam durchgemessen, so war sie bei kleinen Spannungen etwas nach oben verschoben, da bei kleineren Feldstärken die Verunreinigungen Zeit haben, zurückzudiffundieren und erneut zur Stromleitung Veranlassung geben.

Der Verlauf der Stromspannungskurve läßt auf Stoßionisation schließen. Um diese Annahme zu prüfen, erschien es wünschenswert, bei derselben Nitrobenzolsorte die Leitfähigkeitskurven bei verschiedenen Abständen aufzunehmen und es wurde zu diesem Zweck folgende Zellenkonstruktion benutzt.

Zwischen zwei Messingplatten waren Keile so angeordnet, daß durch Verschieben der beiden Platten gegeneinander mittels einer Schraube sich der Abstand änderte. In Fig. 5 sind mit M_1

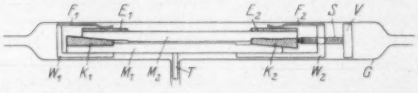


Fig. 5.

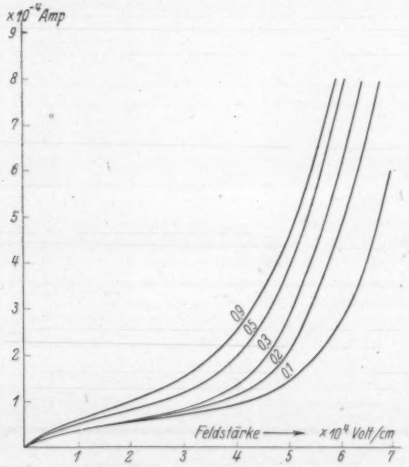
und M_2 die beiden etwa 8 mm starken Kondensatorplatten aus Messing bezeichnet, deren Breite etwa 20 mm und deren Länge etwa 120 mm betrug. K_1 und K_2 stellen die beiden Keile von etwa $^1/_{10}$ Steigung dar, die gleichzeitig zur Isolation dienten und aus Elfenbein, das vom Nitrobenzol nicht angegriffen wird, hergestellt waren. Durch die beiden Federn F_1 und F_2, die an dem mit der Platte M_1 festverbundenen Winkeln W_1 und W_2 befestigt waren, wurden die Kondensatorplatten leicht gegeneinander gedrückt. Die Elfenbeinstückchen E_1 und E_2 dienten zur Isolation. Die Schraube S, die vorn eine Elfenbeinspitze und an ihrem hinteren Ende ein Stück Vierkanteisen V enthielt, bewirkte den Vorschub der Platte M_2. Das Glasrohr G, in welchem die Messingplatten gegen Verschieben durch den Messingstift T gesichert wurden, trägt außerdem noch zwei Durchschmelzungen zur Spannungszuführung. Das Drehen der Schraube wurde mit Hilfe eines an der Stelle des Vierkanteisens über das Glasgefäß geschobenen Elektromagneten vorgenommen, dessen Pole passend ausgefräst waren.

Die Drehung der Schraube S, deren Gewinde sehr sorgfältig ausgeführt war, wurde als Maß für den Vorschub benutzt. Die Abhängigkeit von Schraubendrehung und Plattenabstand wurde aus dem Keilwinkel und der Ganghöhe der Schraube und zur Kontrolle durch Ausmessung des Abstandes unter dem Mikroskop ermittelt.

Bei der Auswertung der Messungen mußte beachtet werden, daß die wirksame Länge der Platten sich mit dem Abstand änderte. Die Korrektion betrug maximal 10 Proz. Andere Einflüsse, wie die Leitfähigkeit an den Enden der Kondensatorplatten (größerer Abstand) und an

den Seitenflächen derselben, wurden vernachlässigt. Als Hauptfehlerquelle war die Bestimmung (Konstanthaltung) der Temperatur anzusehen. Die Messungen wurden daher möglichst schnell und kurz hintereinander durchgeführt und nur solche Meßreihen zur Auswertung herangezogen, bei denen die am Anfang und Ende der Meßreihe bei gleichem Abstand erhaltenen Werte übereinstimmten.

Strom und Spannung wurden mit Drehspulinstrumenten aufgenommen. Die Genauigkeit



Die bei den Kurven angegebenen Zahlen stellen die Abstände in mm dar.

Fig. 6.

betrug mehr als 0,5 Proz. Die Genauigkeit der Abstandsmessung kann mit 0,01 mm angegeben werden.

Eine der aufgenommenen Strom-Spannungs-Kurvenscharen ist in Fig. 6, auf Feldstärke (Volt/cm) umgerechnet, wiedergegeben.

Man sieht aus den Kurven deutlich, daß die Leitfähigkeit

1. bei konstanter Feldstärke und wachsendem Abstand gleichmäßig ansteigt und

2. bei konstantem Abstand und steigender Spannung erst kleiner wird und von einer bestimmten Spannung an wieder sehr stark ansteigt, bis der Durchschlag erfolgt.

Aus obigen Kurven muß auf Stoßionisation geschlossen werden. (Ähnliche Verhältnisse sind bei anderen flüssigen Isolierstoffen (Transformatorölen) vorgefunden worden, und auch hier wurde Stoßionisation vermutet.)

Nimmt man nämlich an, was aus späteren Ergebnissen sehr wahrscheinlich wird, daß sich freie Ionen im Nitrobenzol befinden, so werden dieselben beim Anlegen einer Spannung an die Elektroden wandern und hierbei andere Moleküle ionisieren. Die Anzahl dieser neugebildeten Ionen wird von der Geschwindigkeit der Ionen (Größe der angelegten Spannung) und von dem Weg, auf welchem sie ionisieren können (Abstand der Kondensatorplatten), abhängen. Da die Anzahl der gesamten Ionen, also auch die, welche aus Molekülen neu gebildet sind, die Leitfähigkeit darstellt, kommt man zwangsläufig zu der Annahme einer Stoßionisation.

An dieser Stoßionisation sind die offenbar (aus den folgenden Versuchen wird dies noch klarer hervorgehen) immer noch im bestgereinigten Nitrobenzol enthaltenen Verunreinigungen stark beteiligt. Inwieweit das Nitrobenzol bei diesen Vorgängen selbst Veränderungen erleidet, läßt sich ohne weiteres nicht feststellen.

Zum Schluß sei eine Zusammenstellung der Leitfähigkeitswerte (Minimalwerte) gegeben, wie sie beim Nitrobenzol nach den verschiedenen Reinigungsmethoden erhalten wurden.

1. Mit Luft getrocknet	$L = 1 \cdot 10^{-9}$	$\Omega^{-1}\,\mathrm{cm}^{-1}$
2. außerdem einmal dest.	$L = 1 \cdot 10^{-10}$	
3. Zweimal dest. mit Vorelektrolyse	$L = 6 \cdot 10^{-11}$	
4. außerdem mit Silberoxyd versetzt	$L = 3 \cdot 10^{-11}$	

IV. Versuchsanordnung.

1. Zellenkonstruktionen.

Die Zellengefäße bestanden aus Glas. Nach dem Einbringen des Kondensatorplattensystems ist ein Schmelzen an der Zelle unmöglich, so daß eine Dichtung unvermeidlich war. Da es nach der Angabe anderer Autoren und nach eigenen Erfahrungen keinen Kitt gibt, der sich nachweislich überhaupt nicht in Nitrobenzol löst, wurde, um von vornherein saubere Versuchsbedingungen gewährleisten zu können, von einer Dichtung mit Kitten Abstand genommen und eine Quecksilberdichtung angewendet. So ergab sich folgende Konstruktion:

Ein Glasrohr von etwa 3 cm ∅ und etwa 10 cm Länge war auf beiden Enden zu Tellern umgebogen, die abgeschliffen wurden. Gegen jede Schlifffläche, welche sehr sauber ausgeführt werden mußte, wurde, wie Fig. 7 dies veranschaulicht, eine Planglasplatte P von etwa 2 mm Stärke gelegt. Von den Gummiringen G und dem Hartgummiring H wird ein kreisförmiger Hohlraum gebildet, der nach der Füllung mit Quecksilber einen absolut vakuumsicheren Ver-

schluß garantiert. Durch Anziehen der Schrauben S kann der Druck, mit dem die Planglasplatte gegen den Glasteller liegt, passend eingestellt werden. Um den Messingring M_1 über den

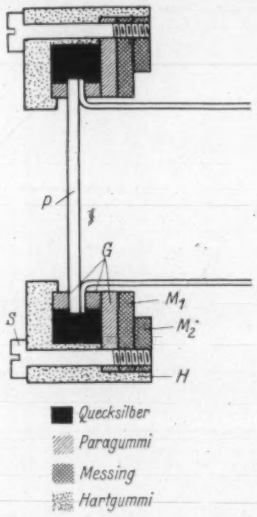


Fig. 7.

Teller zu bringen, ist derselbe geschlitzt und wird durch den Vollring M_2 zusammengehalten. An das Glasrohr waren außerdem noch 4 Ansätze angeschmolzen mit Einschmelzungen für die

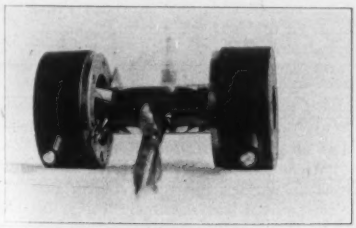


Fig. 8.

Stromzuführungen und die Thermoelemente und zum Einfüllen des Nitrobenzols, wie Fig. 8 dies zeigt.

Zur Füllung einer solchen Zelle wird der obere Ansatz an die Destillationsapparatur bei S (Fig. 3) angeschlossen, während an den unteren Ansatz ein Gefäß von derselben Form wie G (Fig. 3) angeschmolzen wird. Der Bogen (B) wird dann mit flüssiger Luft ausgefroren, bis die Zelle vollständig gefüllt ist. Etwa noch an den Gefäßwandungen und an den Kondensatorplatten haftende Verunreinigungen gehen, soweit sie überhaupt schädlich sind, in Lösung und werden mit in das Gefäß G hineingespült, nachdem bei B geöffnet worden ist. Jetzt wird das Gefäß abgezogen, wonach erst die eigentliche Füllung beginnt, die dann mit dem Abschmelzen am oberen Ansatz beendet ist.

2. Kondensatorplattenanordnung.

Die Kondensatorplatten bestanden aus Messingschienen, die auf jeder Längsseite zwei Vorsprünge trugen, welche zur Aufnahme der abstandhaltenden Glasplättchen dienten. Die Halterung der Messingschienen wurde durch geschliffene Glasstäbchen erreicht, welche in Bohrungen, die sich in den Vorsprüngen befanden, eingepaßt wurden. Außerdem wurde das Kondensatorplattensystem unter Zwischenlage von zwei Messingfedern in die Glaszelle eingeführt. Die einander zugekehrten Flächen der Messingschienen waren genauestens plan geschliffen. Abweichungen von der Planheit können nur Bruchteile von 0,01 mm betragen, wie durch Messungen mit dem Mikroskop festgestellt wurde. Die abstandhaltenden Glasplättchen waren aus ein und derselben planparallelen Platte herausgeschnitten. Die Messung der Dicke erfolgte mit einem Zeissschen Dickenmesser mit einem maximalen Fehler von 0,005 mm.

Die Kondensatorplatten hatten eine Länge von etwa 100 mm, eine Breite von etwa 8 mm und eine Dicke von etwa 5 mm. Die Längenmessung geschah mit mehreren Schublehren. Die Abweichungen der einzelnen Werte zeigten, daß der Meßfehler unter 0,1 mm lag.

Die Länge der Kondensatorplatten war wegen des Randfeldes noch zu korrigieren und zwar nach den Formeln von Lemoine (14) oder Chaumont (11).

Sämtliche Messingteile waren leicht vergoldet, da das Messing sonst im Laufe der Zeit leichte Anlauffarben zeigte.

3. Optische Versuchsanordnung.

Als Lichtquelle diente eine mit Gleichstrom gespeiste Quarzglasquecksilberlampe. Um die grüne Quecksilberlinie (546,1 $\mu\mu$) zu isolieren, war ein Gelatinegrünfilter mit einem Durchlässigkeitsbereich von 505—565 $\mu\mu$ eingeschaltet. Die beiden Nikols waren ausgesucht gute blasen- und schlierenfreie Stücke, wovon die Güte der Messung bei der später beschriebenen photographischen Aufnahme wesentlich abhing. Ihre Dre-

hung konnte an einem in halbe Grade geteilten Teilkreis abgelesen werden. Die Orientierung der Nikols wurde so vorgenommen, daß zunächst einmal diejenige Stellung gesucht wurde, bei der das An- und Abschalten der Spannung an der Kerrzelle keinen Einfluß auf die Intensität des durchfallenden Lichtes hatte. Vor der Messung wurde dann der Polarisator um 45^0 gedreht.

Die optische Anordnung war auf einer optischen Bank aufgebaut und ist im Prinzip in Fig. 9 dargestellt. Der Spalt S wird durch die Quecksilberlampe Qu beleuchtet und das korrigierte

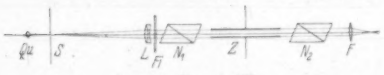


Fig. 9.

Linsensystem L so justiert, daß durch den Filter Fi, den Polarisatornikol N_1, die Kerrzelle Z und den Analysatornikol N_2 ein paralleles Lichtbüschel fällt. Die Justierung der ganzen Anordnung, besonders die der Zelle, mußte sehr sorgfältig ausgeführt werden. Wegen der Forderung möglichst parallelen Lichtes war der Spalt S sehr eng gezogen (0,1—0,05 mm). Im allgemeinen geschah die visuelle Beobachtung durch ein Fernrohr F, das auf unendlich (d. h. auf den Spalt S) eingestellt wurde. Bei den einzelnen Meßmethoden sind die Abweichungen von dieser Beobachtungszeit an der betreffenden Stelle angegeben.

4. Elektrische Versuchsanordnung.

Dieselbe bestand im wesentlichen aus der Hochspannungsanlage, die gleichgerichteten hochgespannten Wechselstrom bis zu 12000 Volt lieferte. Zur Spannungsregulierung wurde die Gleichstromerregung der Wechselstromdynamo verändert.

Die Wechselstromkomponente der der Kerrzelle zugeführten Spannung betrug weniger als $1^0/_{00}$ der Gleichstromspannung, wie sich aus Messungen mit der Braunschen Röhre ergab. Zur Spannungsmessung diente ein Drehspulpräzisionsinstrument von Siemens u. Halske, dem ein aus Konstantandraht gewickelter Widerstand von maximal $4 \cdot 10^6\ \Omega$ (Meßbereich von 12000 Volt) vorgeschaltet wurde. Die Eichung wurde mit zwei anderen Instrumenten derselben Type vorgenommen. Die Abweichungen in den Angaben der drei Instrumente lagen in der Größe der Ablesegenauigkeit, d. h. $1^0/_{00}$. Die Vorschaltwiderstände wurden einzeln einmal mit Normalwiderständen und andererseits mit den von Siemens gelieferten Vorwiderständen für diese Instrumententype verglichen. Die Genauigkeit der Spannungsmessung kann ohne Berücksichtigung des Ablesefehlers auf $1^0/_{00}$ angegeben werden.

5. Temperaturmessung.

Bei der Zelle mit 1 mm Abstand befand sich ein Teil des Glasrohres in einem durch Gummiringe abgeschlossenen Wasserbad, in das das Thermometer eintauchte. Bei der Zelle, mit der durch die photographische Methode und durch Spaltverschiebung die Feldverteilung aufgenommen wurde, war ein kleines Thermometer mit in die Zelle hineingebracht worden. Schließlich wurde bei der letzten Zelle (Streifenmethode) die Temperatur mit 2 Thermoelementen gemessen, welche sich unterhalb und oberhalb des Raumes zwischen den Kondensatorplatten befanden. Die zweite Lötstelle dieser Kupfer-Konstantan-Thermoelemente befand sich in einem Dewargefäß im Wasserbad. Der Thermostrom wurde an einem Spiegelgalvanometer abgelesen. Sämtliche Thermometer waren mit einem Normalthermometer geeicht. Außerdem wurde bei den letzten Messungen die Lufttemperatur gemessen, um festzustellen, welchen Anteil die durch Leitfähigkeit bedingte Stromwärme an der Erwärmung der Zelle hat. Die beiden Thermoelemente ergaben die gleiche Temperatur, so daß angenommen werden muß, daß auch die Angaben des bei den älteren Methoden in der Zelle befindlichen Thermometers mit der Temperatur des Nitrobenzols im Kondensatorspalt übereinstimmen, daß man also mit einer Genauigkeit in der Temperaturbestimmung von $0{,}1^0$ C rechnen konnte. Nur die Temperaturangaben des außerhalb der Zelle befindlichen Thermometers sind unsicher, und zwar konnten, wie Kontrollmessungen ergaben, Differenzen von $\pm\, 0{,}1^0$ C auftreten.

V. Meßmethoden zur Bestimmung der Kerrkonstanten.

Im folgenden soll nur auf das Prinzip der Messungen und auf die Art ihrer Durchführung eingegangen werden. Die Ergebnisse werden später wiedergegeben.

1. Einfache Messungen ohne Berücksichtigung des Feldverlaufes.

Die Messungen erfolgten mit der 1 mm Zelle. Die optische Anordnung entsprach der von Fig. 17. Eingestellt wurden die Spannungen, bei denen sich im Gesichtsfeld maximale Dunkelheit feststellen ließ. Diese „Dunkelspannungen", wie Ilberg (10) sie nennt, erzeugen (siehe Auswertung der Messungen) Gangunterschiede von

$\Delta = 1/2,\ 3/2,\ 5/2$ usw. bei parallel gestellten Nikols,

$\Delta = 1,\ 2,\ 3$ usw. bei gekreuzten Nikols.

Die Einstellgenauigkeit war im allgemeinen nicht größer als $\pm\, {}^1/_2$ Proz., da sich keine absolute Dunkelheit erreichen ließ, und bei höheren Gangunterschieden besser als bei kleineren.

Bestimmung des Feldverlaufes.

a) Photographische Methode.

Zwischen Feldstärke und der von der Kerrzelle hindurchgelassenen Lichtintensität besteht eine rechnerisch erfaßbare Beziehung, so daß der Gedanke nahe lag, durch Messung der letzteren die Feldstärke für jeden Punkt des Raumes zwischen den Kondensatorplatten zu bestimmen.

Zu diesem Zweck wurde an Stelle des bei den früheren Messungen verwandten Fernrohrs eine photographische Platte in den Strahlengang geschaltet. Gefordert werden mußte, daß ein Punkt der photographischen Platte nur von Licht getroffen wurde, welches an einer bestimmten Stelle im Raum zwischen den Kondensatorplatten diesen parallel zu den Planflächen der letzteren passiert hatte, um ein getreues Abbild der Helligkeitswerte zu erhalten. Es mußte demnach mit möglichst parallelem Licht gearbeitet werden. Da die an den Rändern des Kerrzellenspaltes durch Reflektion an den Planflächen der Kondensatorplatten auftretenden Interferenzstreifen erheblich störten, konnte der Spalt im allgemeinen nicht enger als 0,1 mm gezogen werden.

Die photographische Platte wurde nach jeder Aufnahme um gleiche Beträge (etwa 7 mm) quer zur Richtung des Kerrzellenspaltes verschoben. Die Belichtungszeit betrug im allgemeinen 90 Sekunden. Um die erhaltenen Schwärzungen auswerten zu können, wurden vor und nach den Aufnahmen mit elektrischem Feld bei verschiedenen Nikolstellungen Schwärzungsmarken gedruckt. Ausschlaggebend für die Genauigkeit der Messung war das Konstantbleiben der Spannung während der Belichtungszeit und das konstante Brennen der Quecksilberlampe während der ganzen Messung. Daher wurden der Gleichstrommotor, der die Wechselstromdynamo antrieb, und die Quecksilberlampe aus zwei getrennten Akkumulatorenbatterien gespeist. Die Stromaufnahme der Quecksilberlampe wurde während der ganzen Messung kontrolliert und Schwankungen von maximal $^1/_2$ Proz. festgestellt, was Helligkeitsschwankungen von derselben Größe entsprach. Schließlich wurden noch zur Kontrolle am Ende und am Anfang jeder Meßreihe bei gleicher Nikolstellung Schwärzungsmarken gedruckt, deren Auswertung zu demselben Ergebnis führten.

Die Genauigkeit der Schwärzungsmarken ist mit $^1/_2$ Proz. in der Lichtintensität fast ausschließlich gegeben durch die exakte Einstellung des Analysatornikols.

b) Spaltverschiebungsmethode.

Da sich bei den Messungen über die Leitfähigkeit herausstellte, daß dieselbe stark von der Selbstreinigung abhängt, d. h. von der Zeit, während welcher schon eine Spannung an der Zelle gelegen hat, tauchte die Frage auf, ob die Feldverteilung überhaupt oder in welchem Maße sie in Abhängigkeit von der Leitfähigkeit und damit von der Selbstreinigung steht. Es handelt sich also darum, die Feldverteilung möglichst vom Moment des Anlegens der Spannung an als Funktion der Zeit aufzunehmen. Die photographische Methode leistet in dieser Beziehung nichts, da mit der Aufnahme gewartet werden mußte, bis ein stationärer Zustand eingetreten war.

Es wurde deshalb nach einer anderen Methode gesucht und in der im folgenden beschriebenen Anordnung eine befriedigende Lösung gefunden. Anstatt, wie bei der photographischen Methode, bei konstanter Gesamtspannung die Feldverteilung aufzunehmen, wurde jetzt bei konstanter Feldstärke die Spannungsverteilung gemessen, d. h. für jeden Punkt zwischen den Kondensatorplatten war die an der Kerrzelle liegende Spannung zu messen, die nötig war, dort eine bestimmte Feldstärke zu erzeugen. Als Maß für die Feldstärke diente die Helligkeit. Am einfachsten war es, auf Dunkelheit einzustellen.

Um an einer genau definierten Stelle zwischen den Kondensatorplatten die zur Erzielung von Dunkelheit notwendige Spannung (die Dunkelspannung) bestimmen zu können, wurde mit Hilfe eines Spaltes aus dem ganzen durch den Raum zwischen den Kondensatorplatten tretenden Lichtbüschel ein solches von der Breite des Spaltes ($^1/_{10}$ mm) herausgeblendet und für die betreffende Stellung des Spaltes die Dunkelspannung bestimmt. Der Spalt war als ganzer verschiebbar und im parallelen Licht direkt vor der Kerrzelle angeordnet. Sonst war die Versuchsanordnung dieselbe wie in Fig. 17. Die Verschiebung konnte an einer Teilung mit einer Genauigkeit von $^1/_{100}$ mm abgelesen werden. Die Messung wurde zweimal über den Raum zwischen den Kondensatorplatten in entgegengesetzter Richtung durchgeführt, und auf diese Weise festgestellt, ob während der Messung irgendwelche Veränderungen vorgegangen waren.

Neben einer schnellen Durchmessung leistete die obige Methode noch in folgenden Punkten mehr als die photographische: Langsame Schwankungen der Hochspannung spielten keine Rolle, da im Moment der Dunkelheit im Gesichtsfeld die Spannung am Voltmeter abgelesen wurde. Von Helligkeitsschwankungen der Quecksilberlampe war man vollkommen unabhängig wegen Einstellung auf Dunkelheit. Aus demselben Grunde störten auch die Interferenzstreifen nicht, so daß tatsächlich der ganze Kerrzellenspalt durchgemessen werden konnte.

c) Streifenmethode.

Ein Nachteil bei der Spaltverschiebungsmethode bestand in der Schwierigkeit, die Dunkelspannung genau einzustellen. Das lag einmal daran, daß an den Punkten der Spannungs-Helligkeitskurve mit der Steigung 0 (Minimalwert) gemessen wurde und andererseits daran, daß es nicht immer möglich war, vollständige Dunkelheit zu erreichen, wohl wegen der endlichen Breite des Spaltes und einer geringen Wechselstromkomponente der Gleichspannung.

Im nachfolgenden sei eine Methode beschrieben, die eine wesentliche größere Genauigkeit in der Einstellung der Dunkelspannung garantiert.

Betrachtet man nämlich das durch die Kerrzelle fallende parallele Strahlenbüschel, so bemerkt man einen oder mehrere parallel zu den Kondensatorplatten liegende dunkle Streifen, die durch die unregelmäßige Feldverteilung hervorgerufen werden. Um, wie bei der Spaltverschiebungsmethode die Spannungsverteilungskurven aufzunehmen, war es nur nötig, bei Variation der anliegenden Spannung die Lagenveränderung eines bestimmten Streifens festzustellen, um auf diese Weise Kurven gleicher Feldstärke zu erhalten.

Um die Streifenlagen messen zu können, wurde vom Kerrzellenspalt (d. h. der Vorderkante der Kondensatorplatten) mit Hilfe einer an Stelle des Fernrohrs F (Fig. 17) einzuschaltenden Linse ein Bild auf einer Mikrometerteilung entworfen. Die Mikrometerteilung, welche auf einer Länge von 5 mm 100 Teilstriche besaß, wurde dann durch ein Okular betrachtet.

Die beobachteten Dunkelstreifen haben, vor allem bei kleinen Feldstärken, eine, mit dem Kondensatorplattenabstand verglichen, verhältnismäßig große Breite mit in der Intensität nach beiden Seiten flach abfallenden Rändern. Es sieht also auf den ersten Blick so aus, als ob es schwierig sei, den Punkt maximaler Dunkelheit exakt festzustellen. Der Streifen erscheint aber dem Auge (ähnlich wie bei Interferenzstreifen) nach beiden Seiten ziemlich scharf begrenzt, so daß man aus der Lage dieser Seitenkanten die Streifenmitte leicht bestimmen kann.

Der Ausschlag des Galvanometers, welches den Strom der Thermoelemente maß, wurde am Anfang und am Ende jeder aufgenommenen Kurve abgelesen und für die Auswertung ein mittlerer Wert eingesetzt. Die Erwärmung während einer solchen Messung blieb meist unter $0{,}1^0$ C.

VI. Meßergebnisse und Auswertung.

1. Einfache Messungen.

Der Zusammenhang zwischen Lichtintensität und Gangunterschied ergibt sich aus folgendem[1]):

1) Vergleiche dazu auch Ilberg (10).

Für die beiden Lichtkomponenten parallel zum elektrischen Feld (x = Richtung) und senkrecht zu demselben (y = Richtung) kann man an der Stelle des Austritts aus dem elektrischen Feld schreiben:

$$x = A \sin \omega t \tag{4}$$

$$y = A \sin (\omega t + \varphi). \tag{5}$$

Die auf die Kerrzelle fallende Lichtintensität hat die Größe

$$H_0 = 2A^2,$$

da der Polarisatornikol so gestellt wurde, daß die Schwingungsebene des einfallenden Lichtes einen Winkel von 45^0 mit den elektrischen Kraftlinien bildet. Durch Elimination von ωt aus Gl. (4) und (5) resultiert für die Schwingungsellipse

$$y^2 - 2xy \cos\varphi + x^2 = \frac{H_0}{2} \sin^2\varphi,$$

deren Hauptachsen parallel und senkrecht zur Richtung des einfallenden Lichtes liegen. Die Intensität des hindurchgelassenen Lichtes ist

$$H = x^2 + y^2.$$

Für parallel gestellte Nikols ($x = y$) und für gekreuzte Nikols ($x = -y$) erhält man dann unter Berücksichtigung von:

$$\varphi = 2\pi\Delta$$

schließlich

$$H = \frac{H_0}{2}(1 + \cos 2\pi\Delta) \quad (6) \quad \text{(Nikols parallel)}$$

$$H = \frac{H_0}{2}(1 - \cos 2\pi\Delta) \quad (7) \quad \text{(Nikols gekreuzt).}$$

Daraus folgt endlich, daß bei der Dunkelspannung ($H = 0$) der Gangunterschied bei parallel gestellten Nikols ein ungerades Vielfach der Wellenlänge, bei gekreuzten Nikols ein gerades Vielfach der Wellenlänge beträgt.

In der Tab. II sind die Ergebnisse einer Meßreihe zusammengestellt. Das untersuchte Nitrobenzol war unter Zusatz von Silberoxyd zweimal im Vakuum destilliert und vorelektrolysiert worden und besaß eine Leitfähigkeit von $3 \cdot 10^{-11}$ $\Omega^{-1}\,\mathrm{cm}^{-1}$.

Um die Auswertung zu vereinfachen, sind die Dunkelspannungen (3. Spalte) nach der Beziehung (aus Gl. (3))

$$\frac{\Delta_1}{\Delta_2} = \left(\frac{E_1}{E_2}\right)^2 \tag{8}$$

auf $\Delta = 1$ umgerechnet und nach der Temperaturkorrektion von Szivessy (9) auf 20^0 C reduziert.

Die Werte für $\Delta = 1/2$ und 1 zeigen starke einseitige Abweichungen. Es ist sicher, daß hier die ungleichmäßige Feldverteilung eine Rolle

Tabelle II.

	t	Skalenteile am Voltmeter			Mittelwert	Abweichung
			auf $\Delta = 1$ reduziert			
				auf $t = 20°$C reduziert		
1	25,3°C	23,8	23,80	22,75		— 0,42
2		33,3	23,55	22,52		— 0,19
3		40,9	23,62	22,56		— 0,23
4	25,4°C	46,8	23,42	22,37		— 0,04
5		52,3	23,42	22,37		— 0,04
6		57,3	23,41	22,33		0,00
7	25,5°C	61,8	23,37	22,28		+ 0,05
1/2	26,0°C	17,0	24,03	22,85		— 0,52
3/2		28,8	23,53	22,33		0,00
5/2	26,3°C	37,1	23,47	22,30		+ 0,03
7/2		43,9	23,47	22,30		+ 0,03
9/2	62,7°C	50,1	23,60	22,26		+ 0,07
11/2		55,0	23,47	22,13		+ 0,20
13/2		59,7	23,44	22,10		+ 0,23
15/2		64,4	23,53	22,22		+ 0,11
17/2		68,6	23,35	22,21	22,33	+ 0,12
19/2	72,0°C	72,8	23,63	22,22		+ 0,11
21/2		76,3	23,50	22,10		+ 0,23
23/2		80,0	23,60	22,21		+ 0,12
12	27,2°C	82,3	23,77	22,28		+ 0,05
11		78,6	23,67	22,18		+ 0,15
10		75,0	23,73	22,24		+ 0,09
9		71,1	23,72	22,23		+ 0,10
8		67,1	23,73	22,24		+ 0,09
7		62,7	23,72	22,23		+ 0,10
6	27,2°C	58,1	23,72	22,23		+ 0,10
5		53,1	23,75	22,26		+ 0,07
4		47,8	23,90	22,40		+ 0,07
3		41,3	23,85	22,35		— 0,02
2		33,9	23,95	22,46		— 0,13
1	27,3°C	24,1	24,10	22,57		— 0,24

spielt und eine kleinere Feldstärke vortäuscht, da nur der mittlere Teil des Kerrzellenspaltes, in dem ein Feldstärkenminimum herrscht, der Beobachtung zugänglich ist. Aus der Tatsache, daß bei höheren Gangunterschieden das Kerrsche Gesetz innerhalb der Fehlergrenze exakt gilt, kann man schließen, daß die Feldstärkenunterschiede sich bei höheren Spannungen nicht über größere Gebiete erstrecken als bei kleineren. Diese Vermutungen wurden bestätigt (photographische Methode, Streifenmethode). Infolgedessen schien es berechtigt, die bei $\Delta = {}^1/_2$ und 1 gemessenen Werte aus der Mittelwertsbildung auszuschalten. Als neuer Mittelwert folgt dann 22,29 ST. Der Meßbereich des Voltmeters (150 ST) war 10390 Volt. Der Abstand der Kondensatorplatten betrug 0,0993 cm. Die Länge der Kondensatorplatten von 10,02 cm war wegen des Randfeldes noch zu korrigieren. Die scheinbare Verlängerung ergab sich nach der Formel von Lemoine (14) zu $\delta l = 0{,}03$ cm.

Aus obigen Werten folgt endlich für die Kerrkonstante aus Gl. 3:

$$B = 3{,}71 \cdot 10^{-5}.$$

2. Feldverteilungskurven.

Einen vergrößerten Ausschnitt (Negativ) aus einer Aufnahme, wie sie nach der photographischen Methode erhalten wurde, gibt Fig. 10 wieder. Zur Ausmessung der Schwärzung wurden die Aufnahmen auf dem Koch-Goosschen Präzisionsmikroregistrierphotometer durchregistriert.

Da wegen der Verwendung von normalen Nikolschen Prismen die Schwärzungsmarken auf

Schwärzungsmarken | Feldaufnahmen
Fig. 10.

der Platte nicht in einer Richtung lagen und auch eine Kenntnis über die Größe des Schleierabzuges notwendig war, wurden die Platten mehrmals in verschiedenen Richtungen im Photometer durchgemessen und zwar zweimal mit verschiedener Photometerempfindlichkeit.

So konnten sowohl die maximalen als auch die kleinsten, noch für die Messung in Frage kommenden Schwärzungen genau erfaßt werden.

Störend waren vor allem die schon erwähnten Interferenzstreifen, die in der Nähe der Konden-

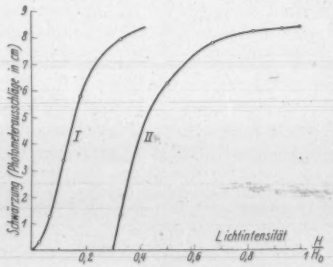


Fig. 11.

satorplatten auftraten. Allerdings fand man dieselben auch in gleicher Form in den Schwärzungsmarken vor, so daß auf diesem Wege eine Elimination derselben möglich war.

Die Lichtintensität H in einer Schwärzungsmarke errechnet sich zu

$$H = \cos^2 \alpha H_0,$$

wenn α den Winkel zwischen den beiden Nikols und H_0 die aus dem Polarisatornikol austretende Lichtintensität bedeutet. In Fig. 11 ist die Schwärzungskurve einer Platte dargestellt; Kurve I wurde mit großer, Kurve II mit kleiner Photo-

meterempfindlichkeit erhalten. Die Ausschläge des Einfadenelektrometers am Photometer erhält man durch Ausmessen der Photogramme. So kann man den durch Ausphotometrieren erhaltenen Schwärzungsverlauf in den Lichtintensitätsverlauf überführen.

Der Zusammenhang zwischen Lichtintensität H und Feldstärke ergibt sich aus den Gl. (6) und (7), wenn man dort Gl. (1) einsetzt.

$$\frac{H}{H_0} = \frac{1}{2}(1 + \cos 2\pi B l \mathfrak{E}^2) \quad (9) \text{ (Nikols parallel)}$$

$$\frac{H}{H_0} = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\pi B l \mathfrak{E}^2) \quad (10) \text{ (Nikols gekreuzt).}$$

Da es nur auf relative Feldstärken ankommt, wurde die Feldstärke nicht in elst. Einh., sondern in $\frac{1}{\sqrt{Bl}}$ gemessen. Die Zahl, welche die Feldstärke in diesen Einheiten angibt, heiße $\mathfrak{E}_r$. Daraus folgt:

$$\mathfrak{E}_r = \mathfrak{E}\sqrt{Bl}. \quad (11)$$

Gl. (10) läßt sich dann darstellen durch Fig. 12. Mit Hilfe derselben erhält man aus dem Lichtintensitätsverlauf eine der relativen Feldstärkenverteilungskurven (Fig. 13).

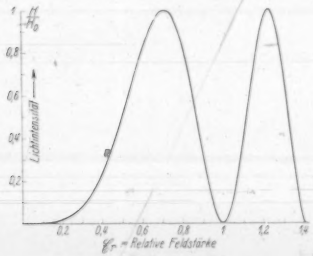


Fig. 12.

Die Größe der an der Kerrzelle liegenden Spannung ist gegeben durch

$$E = \int_0^a \mathfrak{E}\, dx, \quad (12)$$

wo x eine Koordinate in Richtung des elektrischen Feldes bedeutet. Setzt man den Wert von Gl. (11) ein, so erhält man

$$E = \sqrt{\frac{1}{Bl}} \cdot \int_0^a \mathfrak{E}_r\, dx. \quad (13)$$

Der Wert des Integrals läßt sich finden durch Ausplanimetrieren der durch die relative Feldstärkenverteilungskurve und die Kondensatorplatten begrenzte Fläche. Man kann auf diese Weise eine mittlere relative Feldstärke $\mathfrak{E}_m$ finden, die definiert ist durch

$$\mathfrak{E}_m a = \int_0^a \mathfrak{E}_r\, dx. \quad (14)$$

Unter Benutzung dieses Ausdrucks geht Gl. (13) über in

$$E = \sqrt{\frac{1}{Bl}} \cdot \mathfrak{E}_m \cdot a,$$

woraus man schließlich für die Kerrkonstante erhält

$$B = \frac{1}{l}\left(\frac{\mathfrak{E}_m \cdot a}{E}\right)^2. \quad (15)$$

In Tab. III und der zugehörigen Fig. 13 sind die Ergebnisse einer Versuchsreihe niedergelegt. Das untersuchte Nitrobenzol war zweimal im

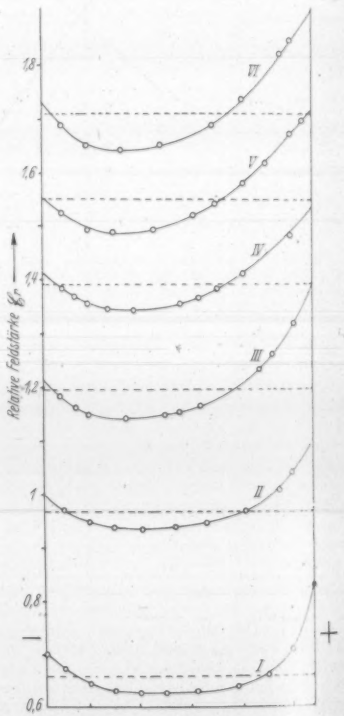


Fig. 13.

Vakuum destilliert und vorelektrolysiert worden und hatte eine Leitfähigkeit von $6 \cdot 10^{-11}$. In den Figuren gibt die gestrichelte Linie die Größe

der mittleren Feldstärke an. Um die Ausrechnung zu vereinfachen, wurde der Ausdruck $\frac{E}{\mathfrak{E}_m}$ gebildet und nach Gl. (9) auf 20° C reduziert.

Tabelle III.

Kurven-Nr.	E in Skalent.	$\mathfrak{E}_m$	t in °C	$\frac{E}{\mathfrak{E}_m}$	$\frac{E}{\mathfrak{E}_m}$ 20 °C	Mittelwert	Abweichungen
I	52,0	0,656	22,1	79,2	77,4		— 0,12
II	77,0	0,966	23,9	79,7	77,1		+ 0,18
III	94,5	1,194	22,4	79,1	77,5		— 0,22
IV	111,0	1,392	24,1	79,7	77,0	77,28	+ 0,28
V	123,5	1,550	22,9	79,7	77,8		— 0,52
VI	136,5	1,709	24,4	79,8	76,9		+ 0,38

Der Abstand der Kondensatorplatten betrug $a = 0{,}3520$ cm, die Kondensatorplattenlänge $l = 10{,}50$ cm, die scheinbare Verlängerung wegen des Randfeldes $\delta l = 0{,}11$ cm. Der Vollausschlag des Voltmeters entsprach 10389 Volt. So ergibt sich für die Kerrkonstante aus Gl. (15) der Wert von

$$B = 3{,}67 \cdot 10^{-5}.$$

Zu der Fig. 13 ist zu bemerken, daß die höchste Feldstärke an der Anode liegt, an der Kathode eine kleinere Feldstärke herrscht und in dem mittleren Raum ein Feldstärkenminimum liegt. Aus früheren Messungen[1]) wurde geschlossen, daß mit wachsender Feldstärke die Feldverteilung die Tendenz hat, zu verflachen. Doch sieht man aus Fig. 13, daß dies tatsächlich nicht der Fall ist.

3. Spannungsverteilungskurven.

a) Spaltverschiebungsmethode.

Als Beispiel einer Meßreihe ist die Tab. IV und die zugehörige Fig. 14 wiedergegeben. Aus den Kurven ersieht man, daß sich ein systematischer Fehler, der durch Temperaturerhöhung oder durch Änderung der Feldstärkenverteilung während einer Messung hätte hervorgerufen werden können, nicht feststellen ließ. Da die Temperaturunterschiede am Anfang und am Ende einer Meßreihe höchstens 0,5° C betrugen, wurde bei der Auswertung eine mittlere Temperatur eingesetzt.

Die Kurvennummern geben die Reihenfolge der Messungen an. Es wurde davon abgesehen, die aufgenommenen Spannungsverteilungskurven in Feldstärkeverteilungskurven umzuzeichnen. Man erhält nämlich sofort den Feldstärkenverlauf, wenn man sich die aufgenommenen Kurven um die gestrichelten Linien als Achsen umgeklappt denkt, wie bei der Berechnung später näher bewiesen wird.

Bei allen Kurven ist charakteristisch, daß das Feldstärkeminimum (Spannungsmaximum) in der Mitte zwischen den beiden Elektroden liegt, wie dies auch bei der photographischen Methode mit derselben Nitrobenzolsorte (und derselben Zelle) gefunden worden war. Man sieht, daß sich die Kurven im allgemeinen mit wachsendem Gangunterschied über größere Spannungsgebiete erstrecken. Kurve I, bei der das Feldstärkemaximum sogar in der Kathode lag, fällt stark heraus, da sie kurz nach Einschalten der Spannung aufgenommen wurde. Die am Schluß der Meßreihe wiederholte Durchmessung (Kurve VI) zeigt, daß sich die Feldverteilung wesentlich geändert hat, da inzwischen die Selbstreinigung eingetreten ist. Bei allen Kurven läßt sich feststellen, daß sie mit Hilfe der Gl. (8) mit guter Annäherung aufeinander zurückgeführt werden können. Der Gültigkeitsbereich der Gl. (8), ursprünglich nur für ein räumlich konstantes Feld abgeleitet, ist damit auch auf räumlich inkonstante Felder erweitert. Es muß nur vorausgesetzt werden, daß sich die Leitfähigkeit und damit die Feldverteilung nicht geändert hat. Diese Bedingungen sind aber sicher während der Dauer der Durchmessung einer Kurve erfüllt, so daß man jetzt durch Umrechnung der Spannungs- auf die Feldverteilungskurven die Kerrkonstante berechnen kann.

Tabelle IV.

Kurve	t in °C	t_{Mittel}	$t_{\text{corr.}}$	Δ	Mittlere Spannung in Skalenteilen			Mittelwert	Abweichung
						$\Delta = 1$			
							$t = 20°$		
I	24,8—25,3	25,15	25,0	1/2	57,07	80,7	77,7		— 0,04
II	25,3—25,9	25,6	25,5	3/2	99,73	81,3	77,55		— 0,29
III	26,0—26,5	26,25	26,05	5/2	128,37	81,2	77,0	77,26	+ 0,26
V	26,5—26,7	26,6	26,4	2	115,27	81,4	76,95		+ 0,31
V	26,7—26,7	26,7	26,5	1	82,07	82,07	77,55		— 0,29
VI	26,7—26,8	26,75	26,55	1/2	57,75	81,6	77,2		+ 0,06

1) In einer Veröffentlichung über Teile vorliegender Arbeit (Physik. Zeitschr. **30**, 20, 1929) sind die Worte Anode und Kathode in Fig. 3 zu vertauschen. Gleichfalls ist Seite 24, Zeile 8 das Wort Kathode durch Anode zu ersetzen.

Auf einer Spannungsverteilungskurve ist $\Delta = \text{const}$ und die Dunkelspannung E eine Funktion von x

$$E = f(x),$$

wo x eine Koordinate in Richtung des elektrischen Feldes bedeutet, an der einen Elektrode den Wert o und an der anderen Elektrode den Wert a besitzt.

Auf einer Feldverteilungskurve ist $E_1 = \text{const}$ und die Werte der auf derselben herrschenden Δ_1 werden sich mit x ändern.

$$\Delta_1 = g(x).$$

Nach Gl. (8) und den obigen Ausführungen gilt aber für jedes x

$$\Delta_1 = \Delta \left(\frac{E_1}{E}\right)^2$$

und nach Einsetzen des Wertes von Δ_1 aus Gl. (1)

$$\mathfrak{E} = \sqrt{\frac{\Delta}{Bl}} \cdot \frac{E_1}{E}.$$

Damit sind die Feldverteilungskurven gegeben mit E_1 als Parameter. E_1 stellt gewissermaßen die an

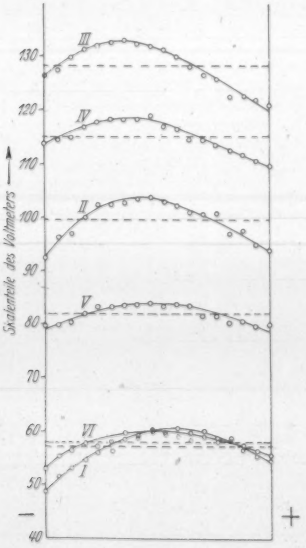


Fig. 14.

der Kerrzelle liegende Spannung dar. Daher kann jetzt analog zu Gl. (12) und (13) verfahren werden.

$$E_1 = \int_0^a \mathfrak{E}\, dx = E_1 \sqrt{\frac{\Delta}{Bl}} \int_0^a \frac{dx}{E},$$

so daß sich für die Kerrkonstante ergibt

$$B = \frac{\Delta}{l} \left[\int_0^a \frac{dx}{E}\right]^2. \tag{16}$$

Die Auswertung dieses Integrals für jede Kurve ist sehr mühsam. Es wurde deshalb nach einem passenden Annäherungsverfahren gesucht und der naheliegende Ansatz gemacht,

$$\int_0^a \frac{dx}{E} = \frac{a^2}{\int_0^a E\, dx} = \frac{a}{E_m} \tag{17}$$

wo E durch

$$E_m \cdot a = \int_0^a E\, dx \tag{18}$$

definiert ist. Es war nun zu untersuchen, welcher Fehler mit diesem Ansatz gemacht wurde, d. h. welchen Wert F (Quotient aus richtigem und

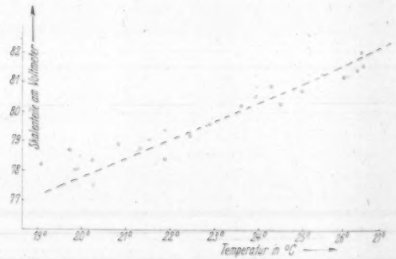


Fig. 15.

falschem Wert) annahm. Um das Integral auswerten zu können, wurden die Spannungsverteilungskurven durch zwei integrierbare Funktionen angenähert,

1. durch eine Parabel, deren Scheitelwert mit E_{max} zusammenfällt und die außerdem durch E_{min} geht,

2. durch zwei Geraden, die von den Punkten kleinster Feldstärken (E_{max}) zum Punkt der höchsten Feldstärke (E_{min}) laufen.

Aus den Kurven erkennt man, daß der Wert von

$$\frac{E_{max}}{E_{min}} = \frac{10}{9}$$

kaum überschritten wird. Für diesen Fall erhält man

aus 1. $F = 1{,}00096$

aus 2. $F = 1{,}00092.$

Tabelle V.

Vergleichsthermometer auf Normalthermometer reduziert
Beginn der Messung: 21,60°
Ende „ „ : 21,70°
Nullstellung des Galvanometers
Beginn der Messung: 12,1 ST
Ende „ „ 11,3 ST

Streifen	t Luft °C	Galv. Ausschlag	Thermostrom	t Diff. °C	t °C	Mittlere Spannung $\Delta = 1$		$t = 20°$	Mittelwert	Abweichung
I	25,0	26,4	14,3	2,72	24,42	48,60	48,60	46,83		0,0
II	25,3	27,05	15,1	2,86	24,46	68,67	48,57	46,70		0,13
III	25,5	28,1	16,2	3,08	24,68	84,03	48,51	46,57		0,26
IV	25,7	29,5	17,3	3,29	24,89	97,78	48,93	46,93		0,1
V	25,7	30,85	19,2	3,65	25,30	109,81	49,08	46,91	46,83	0,08
VI	25,8	32,25	20,7	3,94	25,64	120,34	49,20	46,83		0,0
VII	26,0	34,3	22,9	4,35	26,06	130,40	49,35	46,80		0,03
VIII		31,6	20,3	3,86	25,56	139,76	49,42	47,05		0,22

Die aufgenommenen Spannungsverteilungskurven werden von der geknickten Geraden und der Parabel eingeschlossen, so daß für dieselbe die Berechnung des Wertes von F auf mehr als 10 Proz. genau angesehen werden kann.

Die Größe der Kerrkonstante ergibt sich nach obigem aus Gl. (16) und (17) zu:

$$B = \frac{\Delta}{l}\left(\frac{a}{E_m}\cdot 1{,}001\right)^2. \qquad (19)$$

Die Messungen erfolgten mit derselben Zelle und derselben Füllung wie bei der Messung nach der photographischen Methode. Um die Auswertung zu vereinfachen, wurden die mittleren Spannungen E_m (gestrichelte Linien in der Fig. 14) nach Gl. (8) auf $\Delta = 1$ umgerechnet.

In Fig. 15 sind diese als Funktion der Temperatur aufgetragen. Man erkennt, daß die Temperaturabhängigkeit befriedigend mit der von Szivessy gefundenen (gestrichelte Kurve) übereinstimmt. Nach Reduzierung dieser Werte auf 20° C folgt aus Gl. (19) für die Kerrkonstante der Wert von

$$B = 3{,}63 \cdot 10^{-5}.$$

b) Streifenmethode.

In Fig. 16 und 17 (Tab. V) sind zwei Beispiele der verschiedenen Meßreihen dargestellt. Es fällt auf, daß die Kurven eine andere Tendenz zeigen, als die früher erhaltenen.

Aus Fig. 16 erkennt man, daß die Spannungsverteilungskurven praktisch Gerade sind, die parallel zueinander verlaufen. Es ist hier also nicht mehr die Rede davon, daß für jedes x (Koordinate in Richtung des elektrischen Feldes) die Gl. (8) gilt. Wenn die Aufnahme zweier be-

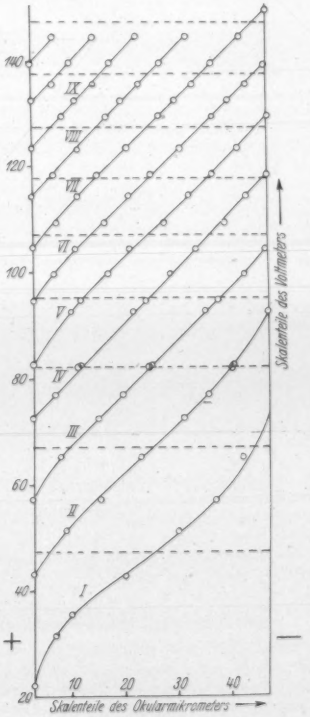


Fig. 16.

nachbarter Kurven kurzzeitig nacheinander erfolgt und die Spannung nicht um größere Beträge geändert wurde, so kann man sich die eine Kurve aus der andern durch Parallelverschiebungen entstanden denken. In dem Gebiet, über das

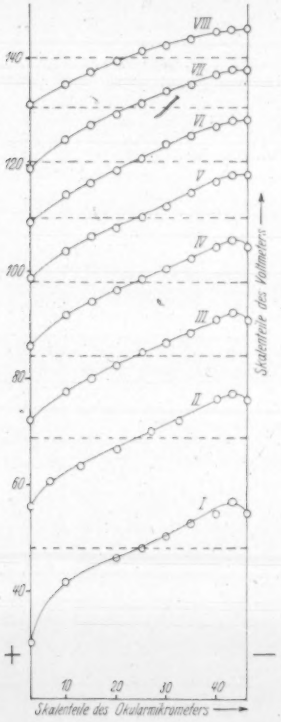


Fig. 17.

sich eine Spannungsverteilungskurve erstreckt, sind die benachbarten Spannungsverteilungskurven also sicher kongruent.

Bildet man andererseits nach Gl. (18) die mittleren Spannungen, so erkennt man (siehe Tab. V), daß diese innerhalb der Fehlergrenzen exakt dem Kerrschen Gesetz, d. h. Gl. (8) genügen.

Jetzt läßt sich aber die Umrechnung der Spannungs- in die Feldverteilungskurven durchführen.

Die Schnittpunkte jeder Kurve mit der zugehörigen mittleren Spannung (gestrichelte Geraden in Fig. 16 und 17) liegen auf der Geraden $x_1 = \text{const}$. Auf dieser Geraden gilt dann exakt Gl. (8). Im Spannungsverteilungsdiagramm der Fig. 18 ist diese Gerade und eine aufgenommene Spannungsverteilungskurve, auf welcher der Gangunterschied Δ herrscht, gezeichnet. Die gestrichelte Gerade der mittleren Spannung E_m ist wieder durch Ausplanimetrieren gefunden worden. Um die Feldverteilungskurve mit E_m als Parameter zu gewinnen, muß für jeden Wert von x der Gangunterschied Δ_1 berechnet werden,

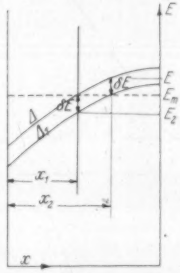


Fig. 18.

der auf der Geraden $E_m = \text{const}$ herrscht. Man zieht zu diesem Zweck für das betreffende x_2 durch E_m die zu Δ parallele Spannungsverteilungskurve Δ_1. Dieselbe schneidet die Gerade $x_1 = \text{const}$ im Punkte E_2. Aus Fig. 18 erkennt man

$$E_2 = E_m - \delta E$$

und für x_2

$$\delta E = E - E_m.$$

So erhält man schließlich unter Benutzung von Gl. (8):

$$\Delta_1 = \Delta \left(\frac{2E_m - E}{E_m} \right)^2.$$

Berücksichtigt man weiter Gl. (1), so sind die Feldverteilungskurven durch

$$\mathfrak{E} = \sqrt{\frac{\Delta}{Bl}} \cdot \frac{2E_m - E}{E_m}$$

gegeben. Nach früherem gilt aber:

$$E_m = \int_0^a \mathfrak{E}\, dx = \frac{1}{E_m} \sqrt{\frac{\Delta}{Bl}} \int_0^a (2E_m - E)\, dx,$$

so daß man schließlich unter Verwendung von Gl. (18) als Wert für die Kerrkonstante erhält

$$B = \frac{\Delta}{l} \left(\frac{a}{E_m} \right)^2. \qquad (20)$$

Die Lage der maximalen Schwärzung in einem Streifen wurde, wie früher schon gesagt, so gefunden, daß von der „Streifenbreite" die Mitte genommen wurde. Das ist aber nicht richtig. Im folgenden sei kurz darauf eingegangen, wie groß der Fehler ist.

Betrachtet man die Helligkeitsverteilung im Spannungsverteilungsdiagramm (z. B. Fig. 16) für $x = \text{const}$, so erhält man eine Helligkeitsverteilung, wie sie Fig. 12 entspricht. Sie läßt sich (bis auf einen Proportionalitätsfaktor von E) durch

$$H = \frac{H_0}{2}(1 - \cos 2\pi E^2) \qquad (21)$$

darstellen.

Die Dunkelstreifen seien der Reihe nach mit $n = 1, 2, 3$ usw. bezeichnet. Unter Zugrundelegung von Gl. (21) liegen dann die Stellen maximaler Dunkelheit bei $E = \sqrt{n}$, die Stellen maximaler Helligkeit bei $E = \sqrt{\frac{2n-1}{2}}$. Entsprechen den Rändern eines Streifens die Spannungen E_1 und E_2, so liegt die gemessene Streifenmitte also bei $\frac{E_1 + E_2}{2}$, während die Stelle maximaler Dunkelheit bei $E = \sqrt{n}$ liegt. Die prozentische Abweichung zwischen diesen beiden Werten ist

$$A = 1 - \frac{E_1 + E_2}{2\sqrt{n}}.$$

Die „Streifenbreite" erschien dem Auge im allgemeinen gleich $^1/_3$ des Abstandes der benachbarten Helligkeitsmaxima, woraus folgt:

$$E_2 - E_1 = \frac{\sqrt{\frac{2n+1}{2}} - \sqrt{\frac{2n-1}{2}}}{3}.$$

Aus der Bedingung, daß bei E_1 und E_2 gleiche Helligkeit herrscht, ergibt sich:

$$\cos 2\pi E_1^2 = \cos 2\pi E_2^2$$

und daraus

$$E_1^2 + E_2^2 = 2n.$$

Unter diesen Voraussetzungen resultiert für A, wenn man die Endformel zweimal in eine Reihe entwickelt und nach dem zweiten Glied abbricht

$$A = \frac{1}{288 n^2}.$$

Hieraus erhält man für den

1. Dunkelstreifen ($n = 1$): $A = 0{,}003$
2. Dunkelstreifen ($n = 2$): $A = 0{,}0008$.

Was die Temperaturmessung anbetrifft, so ist in der Tab. V der Thermostrom in Skalenteilen (1 ST = 10 mm) des Galvanometerausschlages angegeben. 1 ST entsprach $0{,}19^0$ C. Hieraus ergibt sich die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Lötstellen.

In Fig. 19 sind die auf $\Delta = 1$ umgerechneten mittleren Spannungen (wieder durch Ausplanimetrieren gefunden) als Funktion der Beobachtungstemperatur aufgetragen. Die gestrichelte Kurve gibt die Temperaturabhängigkeit nach Szivessy wieder.

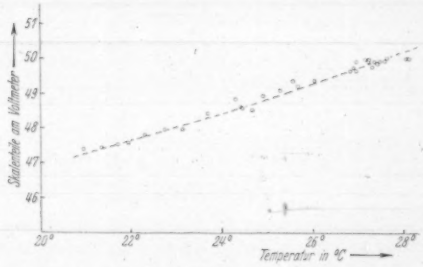


Fig. 19.

Wurden diese Werte für $\Delta = 1$ noch auf 20^0 C reduziert, so erhielt man aus den verschiedenen Messungen als Gesamtmittelwert 46,80 ST. 150 ST entsprachen 11970 Volt. Der Plattenabstand betrug 0,2470 cm, die auf Randfeld korrigierte Kondensatorplattenlänge 10,52 cm. Die Kerrkonstante ergibt sich dann aus Gl. (20) zu

$$B = 3{,}74 \cdot 10^{-5}.$$

Zu den Fig. 16 und 17 ist noch folgendes zu sagen: Die Messungen in Fig. 16 wurden wenige Stunden nach der Füllung der Zelle vorgenommen. Diese Nitrobenzolsorte, welche mit Silberoxyd versetzt worden war, zeigt eine sehr ausgeprägte, fast geradlinige Feldverteilung. Die Leitfähigkeit lag bei $3 \cdot 10^{-11}$.

Die in der Fig. 17 niedergelegten Messungen sind einige Wochen später ausgeführt worden. Kurz nach Anlegen der Spannung (Kurve I) liegt das Feldstärkeminimum in der Nähe der Kathode, rückt aber später wieder ganz an die Kathode heran. Die Kurven liegen viel flacher als früher. Nachdem die Spannung längere Zeit an der Kerrzelle gelegen hatte, wurde umgepolt. Das Feldstärkeminimum lag zuerst an der Anode, dann werden die Kurven immer flacher, der Potentialabfall zwischen den Elektroden wird fast geradlinig, bis schließlich bei höheren Feldstärken an der Anode eine höhere Feldstärke herrscht als an der Kathode. Nach einiger Zeit hatten die Kurven den gewohnten Verlauf.

Tabelle VI.

Entspricht Figur (Tabellen)	Reinigungsmethode	Leitfähigkeit in $\Omega^{-1}\,cm^{-1}$	Meßmethode	Kerrkonstante	Fehler
Vorveröffentlichung	1 dest.	$7 \cdot 10^{-11}$	einfach	$3{,}50 \cdot 10^{-5}$	2,0 Proz.
	1 dest.	$1 \cdot 10^{-10}$	photogr.	$3{,}47 \cdot 10^{-5}$	2,2 Proz.
13 (III)	2 dest.	$6 \cdot 10^{-11}$	photogr.	$3{,}67 \cdot 10^{-5}$	1,5 Proz.
14 (IV)	und vorelektr.	$6 \cdot 10^{-11}$	Spaltversch.	$3{,}63 \cdot 10^{-5}$	1,0 Proz.
(II)	2 dest. vorelektr.	$3 \cdot 10^{-11}$	einfach	$3{,}71 \cdot 10^{-5}$	1,6 Proz.
16, 17 (V)	Suberoxyd	$3 \cdot 10^{-11}$	Streifen	$3{,}74 \cdot 10^{-5}$	0,8 Proz.

Bei diesen Messungen war die Leitfähigkeit gegen früher etwas größer geworden und betrug $4 \cdot 10^{-11}$.

4. Fehlerdiskussion.

Der Fehler bei der Bestimmung der Länge der Kondensatorplatten lag unterhalb von 0,1 mm einschließlich der Unsicherheit in der Randfeldkorrektion und betrug daher bei der bei allen Messungen verwandten Plattenlänge von 100 mm 0,1 Proz.

Bei der Abstandsmessung lagen die Fehler in der Dickenmessung der Glasplättchen und der Unkenntnis über die Planheit der Kondensatorplatten. Der mögliche Fehler kann nach früherem zu 0,005 mm angenommen werden.

Wegen der ungenauen Temperaturbestimmung mußte bei den einfachen Messungen mit einem Fehler von 0,3 Proz., bei den späteren Messungen mit 0,1—0,2 Proz. gerechnet werden.

Die Spannungsmessung war bei den ersten Messungen auf 0,2 Proz. genau, später betrug die Genauigkeit 0,1 Proz.

Ablesefehler in der Spannungsmessung spielten keine Rolle, da immer aus einer größeren Anzahl von Messungen der Mittelwert gebildet wurde.

Es konnte festgestellt werden, daß der Fehler, der durch ungenaues Ausplanimetrieren der Kurven bedingt war, den Wert von 0,1 Proz. nicht überstieg. Wegen der Mittelwertbildung aus mehreren Kurven kann der Fehler vernachlässigt werden.

Des besseren Überblicks wegen sind sämtliche für die Kerrkonstante gefundenen Werte (auch die der Vorveröffentlichung) unter Angabe des maximalen Fehlers in Tab. VI zusammengestellt.

VII. Diskussion der Resultate.

1. Größe der Kerrkonstante.

Aus Tab. VI erkennt man, daß mit wachsender Reinheit des Nitrobenzols auch die Kerrkonstante größer wird[1]). Bei derselben Nitrobenzolsorte liefern die verschiedenen Meßmethoden innerhalb der Fehlergrenze gleiche Werte. Als bester Wert kann der von

$$B = 3{,}74 \cdot 10^{-5}$$

angesehen werden.

Wenn man diesen Wert mit den Ergebnissen von Leiser, Cotton und Mouton und Lyon vergleicht, so findet man eine gewisse Übereinstimmung. Man kann also sagen, daß die mit Wechselstrom hoher Periodenzahl und die mit Gleichstrom unter Berücksichtigung der Feldverteilung gefundenen Werte übereinstimmen.

Die von Mc Comb und Szivessy mit Gleichstrom gefundenen Kerrkonstanten sind sicher falsch. Die zu kleinen Werte sind nach den Ergebnissen vorliegender Arbeit dadurch zu erklären, daß die ungleichmäßige Feldverteilung nicht berücksichtigt worden ist.

Andererseits wurde bei allen Messungen festgestellt, daß die Größe der Kerrkonstante vollkommen unabhängig von dem Verlauf der Feldverteilung ist. Desgleichen konnte bei verschiedenen Nitrobenzolsorten keine Beziehung zwischen Reinheit und Feldverteilung gefunden werden. Bei derselben Nitrobenzolsorte konnte jedoch fast ausnahmslos festgestellt werden, daß mit kleiner werdender Leitfähigkeit durch Selbstreinigung die Feldverteilungskurven verflachen.

Die Frage, wieweit der oben angegebene Wert für die Kerrkonstante richtig ist, d. h. wie nahe er dem Wert für absolut reines Nitrobenzol kommt, läßt sich erst entscheiden, nachdem man sich über die Art der Verunreinigung und den Mechanismus der Stromleitung klar geworden ist.

1) Zu demselben Ergebnis kommt Hehlgans in einer Veröffentlichung (Zeitschr. f. techn. Phys. **10**, 634, 1929), die nach Abschluß vorliegender Arbeit (Juli 1929) erschien. Allerdings dürften die Messungen von Hehlgans, welcher bei grünem Licht und 20° C (?) für die Kerrkonstante des Nitrobenzols Werte bis zu $4{,}5 \cdot 10^{-5}$ findet, kaum quantitatives Interesse beanspruchen. Soweit man nämlich aus der Arbeit entnehmen kann, ist wegen der Ungenauigkeit in der Abstands- und Temperaturmessung ein Fehler bis zu 20 Proz. in der Größe der Kerrkonstante nicht ausgeschlossen.

2. Art der Verunreinigung.

Die Feldstärke an einer bestimmten Stelle im Kerrzellenspalt ist offenbar umgekehrt proportional der Anzahl der dort befindlichen Ionen. Es ist unwahrscheinlich, daß das Nitrobenzol selbst dissoziiert ist, so daß das Vorhandensein einer Verunreinigung, die Ionen liefert, anzunehmen ist. Aus Fig. 12 erkennt man, daß in der Nähe der Elektroden eine größere Feldstärke herrscht, d. h. eine Verarmung von Ionen eingetreten ist. Man könnte also vermuten, daß im Kerrzellenspalt eine größere Menge einer dissoziierten Verunreinigung vorhanden ist, aus welcher jetzt bei Anlegen der Spannung die Ionen nach beiden Elektroden hin langsam abwandern. Da nun die Feldstärke an der Anode am größten ist, also hier die Ionen am schnellsten weggewandert sind, muß das Kation der Verunreinigung eine größere Wanderungsgeschwindigkeit besitzen, als das Anion. Als Verunreinigung kommt demnach eine Säure in Frage, was sehr plausibel ist, da von der Herstellung des Nitrobenzols her sehr wohl noch Reste von Salpetersäure oder salpetriger Säure vorhanden sein können. Diese Vorstellung, daß also die Ionen aus einem großen Säurevorrat langsam an die Elektroden wandern, ist aber offenbar nicht richtig, wie man aus folgendem erkennt:

Nimmt man an, daß die Beweglichkeiten der Wasserstoff- und der Salpetersäurerestionen in Nitrobenzol in derselben Größe liegen wie in Wasser, so kommt man bei Feldstärken von 50000 Volt/cm zu Wanderungsgeschwindigkeiten von etwa 150 cm/sec. Der Abstand der Kondensatorplatten betrug 3 mm, so daß sich innerhalb von Bruchteilen von $^1/_{100}$ sec sämtliche Ionen an den Elektroden abgeschieden haben müßten. Nun trifft dies offenbar nicht ganz zu. In dem Augenblick nämlich, in dem der Raum in der Nähe der Elektroden an Ionen verarmt, wird von diesem Raum ein großer Teil der Feldstärke aufgenommen, so daß die jetzt auf die Ionen wirkende Kraft und damit deren Wanderungsgeschwindigkeit kleiner wird. Es ist also durchaus möglich, daß die Abscheidung der Ionen sich auf eine größere Zeit, vielleicht einige Sekunden, erstreckt. Wollte man annehmen, daß die Abwanderung der Ionen auch noch während der Durchführung der Messungen vor sich geht, so müßte die Feldstärke im mittleren Raum des Kerrzellenspaltes fast auf Null absinken. Wie man aus den aufgenommenen Feldverteilungskurven sieht, ist das aber niemals beobachtet worden. Man erkennt also, daß die oben geschilderten Vorgänge den Einschaltstromstoß liefern, mit dem stationären Zustand während der Messungen jedoch nichts zu tun haben.

Für die Annahme, daß die Verunreinigung eine Säure ist, sprechen folgende Tatsachen: Die mehrfache Destillation unter vermindertem Druck brachte keine wesentlichen Fortschritte, da die Säure wegen ihrer Flüchtigkeit mit hinüberdestilliert. Ähnlich liegen die Verhältnisse bei der Vorelektrolyse. Scheiden sich die Säureionen an den Silberelektroden der Elektrolysiergefäße ab, so kommt es sehr wahrscheinlich zur Entstehung eines Silbersalzes und zur Zersetzung des Nitrobenzols durch den entstehenden Wasserstoff. Die Reaktionsprodukte werden auch in die Kerrzelle gelangen. Infolgedessen ist es verständlich, wenn die Vorelektrolyse nicht den anfangs vermuteten Erfolg hatte. Wie später noch genauer ausgeführt, brachte erst die Anwendung von Silberoxyd eine solche Konzentrationsverminderung der Verunreinigung, daß die Feldstärkekurven annähernd geradlinig wurden. Das Silberoxyd bildet bekanntlich mit einer Säure das entsprechende Salz, welches nun schon im ersten Vorratsgefäß zurückbleibt. Das entstehende Wasser wird wegen des sehr viel kleineren Dampfdruckes bei der zweifachen Destillation zum größten Teil abgepumpt und hat offenbar, selbst wenn es in die Kerrzelle gelangt, eine in viel geringerem Maße störende Wirkung als eine Säure.

Die Annahme der Verunreinigung durch eine Säure sei daher weiter beibehalten und darauf eingegangen, wie man sich das Entstehen der Feldverteilungskurven in den Fig. 16 und 17 erklären könnte.

Haben sich in einer verhältnismäßig kurzen Zeit nach dem Anlegen der Spannung an den Elektroden die Ionen abgeschieden, so wird der an der Kathode entstehende Wasserstoff in statu nascendi das Nitrobenzol zersetzen und dabei Benzol und salpetrige Säure bilden. Der an der Anode abgeschiedene Säurerest kann nun das Nitrobenzol in Dinitrobenzol umwandeln und andererseits auch Salpetersäure bilden. An beiden Elektroden wird demnach Säure entstehen, die sofort wieder dissoziiert.

Betrachtet man erst einmal die Vorgänge an der Kathode, so kann man sich vorstellen, daß die bei der Entstehung von Säure gebildeten Wasserstoffionen sich sofort wieder an der Kathode abscheiden, während die Säurerestionen von der enorm großen Feldstärke zum Teil als freie Ionen im Kerrzellenspalt gehalten werden. Diese freien Ionen bilden nun eine Raumladung, welche andererseits nach dem Coulombschen Gesetz eine Ungleichmäßigkeit der Feldstärke bedingt. Es ist nun zu überlegen, wie groß diese Ungleichmäßigkeit der Feldstärke im Maximum werden kann und ob sie ausreicht, die beobachteten Feldverschiedenheiten (Neigung der Feldverteilungskurve) zu erklären. Nimmt man zu-

nächst an, daß die Wasserstoffionen sich sämtlich abgeschieden haben und nur Säurerestionen im Kerrzellenspalt vorhanden sind, so kann man aus der Größe des beobachteten Stromes unter Zugrundelegen einer bestimmten Wanderungsgeschwindigkeit die Dichte der Säurerestionen ausrechnen und daraus einen Wert für die zwischen Anode und Kathode herrschende Feldstärkedifferenz gewinnen:

Die Stromdichte betrug im günstigsten Fall $1 \cdot 10^{-8}$ Amp./cm². Bei einer Wanderungsgeschwindigkeit von etwa 100 cm/sec wäre demnach die im Kerrzellenspalt vorhandene Ionenladung $\varrho = 10^{-8}$ Coul/cm³, d. h. 30 elst. Lad. Einh./cm³. Andererseits ist aber die Zunahme der Feldstärke

$$\frac{\partial \mathfrak{E}}{\partial x} = 4\pi\varrho, \qquad (22)$$

in unserem Fall also etwa 360 elst. Einh./cm oder in technischen Einheiten: etwa 100000 Volt/cm. Aus den Feldverteilungskurven liest man nur eine Feldstärkezunahme von höchstens 20000 Volt/cm ab. Die oben berechnete Größe der Raumladung reicht also bei weitem aus, um die beobachteten Feldstärkeunterschiede zu erklären. Daß der berechnete Wert zu groß ausgefallen ist, liegt daran, daß der Kerrzellenspalt nicht ganz frei von Wasserstoffionen ist. Einmal werden sich also nicht alle Wasserstoffionen sofort an der Kathode abscheiden, während sich die Säurerestionen noch im Kerrzellenspalt befinden, andererseits sind die Vorgänge an der Anode selbst bisher noch unberücksichtigt geblieben. Es entsteht hier ja ebenfalls eine Säure, die ihren Säurerest an die Anode abgibt und die Wasserstoffionen zur Kathode schickt. Da nun die Wanderungsgeschwindigkeit der Wasserstoffionen sicher größer ist als die der Säurerestionen, welche von der Kathode kommen, so wird die Konzentration der Wasserstoffionen infolgedessen auch kleiner sein. Die im Überschuß vorhandenen Säurerestionen werden dann zu einer Raumladungsbildung Veranlassung geben. Macht man die Annahme, daß sich die Wanderungsgeschwindigkeiten der Wasserstoff- und der Säurerestionen wie 5 : 4 verhalten, so wird das Verhältnis der Dichten 4 : 5 sein. Die Dichte der freien Säurerestionen wäre dann nur noch $^1/_5$ von der früher berechneten, so daß auch die berechneten Feldstärkedifferenzen von 100000 Volt/cm auf $^1/_5$ heruntergehen. Auf diese Weise würden dann die berechneten und die beobachteten Werte übereinstimmen. Um diese aus den Feldstärken gefolgerten Zahlen zu bestätigen, müßten allerdings die Wanderungsgeschwindigkeiten der Ionen in Nitrobenzol gemessen werden.

Da als sehr wahrscheinlich anzunehmen ist, daß die Dichte der die Raumladung bildenden Säurerestionen im Kerrzellenspalt überall annähernd konstant ist, kommt man nach Gl. (22) zu einer Feldverteilung, die ziemlich geradlinig von der Kathode zur Anode ansteigt (Fig. 16). Den annähernd parallelen Verlauf der einzelnen Feldverteilungskurven kann man nach dieser Anschauung auch sehr einfach erklären. Da nämlich Strom und Spannung einander proportional sind und die Wanderungsgeschwindigkeit ebenfalls proportional mit der Spannung anwächst, so wird die früher ausgerechnete Anzahl der im cm³ befindlichen Ionenladung unabhängig von der Spannung sein. Infolgedessen wird bei gleichem Konzentrationsverhältnis der Wasserstoff- und Säurerestionen immer eine gleichbleibende Feldstärkedifferenz erforderlich sein, um die im Überschuß befindlichen Säurerestionen zur Anode zu transportieren.

Aus Fig. 17 erkennt man eine leichte Krümmung der Feldstärkeverteilungskurven besonders in der Nähe der Kathode. In den Kurven I bis IV ist das Feldstärkeminimum sogar etwas von der Kathode abgerückt. Bei der Aufnahme dieser Kurven wurde festgestellt, daß die Leitfähigkeit (gegen Fig. 16) etwas größer geworden war. Es scheint also, als ob die jetzt an der Kathode entstehende größere Säuremenge nicht sofort vollständig dissoziiert, sondern zum Teil in das Nitrobenzol hineindiffundiert. In wachsender Entfernung von der Kathode nimmt die Dichte der undissoziierten Säure ab und die entstehenden Wasserstoff- und Säurerestionen nehmen an der Stromleitung teil. Die Ionendichten sind nicht mehr räumlich konstant, sondern die Dichte der Wasserstoffionen nimmt nach der Kathode hin, die der Säurerestionen nach der Anode hin zu. Gl. (22) liefert jetzt nach der Anode hin einen stärkeren, nach der Kathode hin einen schwächeren Anstieg. Es besteht auch die Möglichkeit, daß in einer bestimmten Entfernung von der Kathode eine gleich große Anzahl der beiden Ionenarten vorhanden ist. Zwischen diesem Punkt der kleinsten Feldstärke und der Kathode sind dann Wasserstoffionen im Überschuß, so daß in diesem Raum die Feldverteilungskurve wegen Gl. (22) eine entgegengesetzte Richtung haben muß, wie sie früher gefunden wurde. Man sieht also, daß sich auch die Feldverteilungskurven aus Fig. 17 erklären lassen.

Bis jetzt sind die Ergebnisse diskutiert worden, welche bei einer Nitrobenzolsorte, die mit Silberoxyd versetzt worden war, und eine sehr kleine Leitfähigkeit besaß, gefunden wurden. Betrachtet man nun die Kurven der Fig. 13 und 14, so könnte es auf den ersten Blick scheinen, als ob hier prinzipiell andere Feldverteilungen vorliegen. Das ist aber nicht der Fall. Es ist schon

oben erkannt worden, daß mit wachsender Leitfähigkeit das Feldstärkeminimum von der Kathode abrückt. Bei den jetzt zur Diskussion stehenden Messungen war die Leitfähigkeit zwei bis dreimal so groß wie früher und infolgedessen auch die entstehenden Säuremengen im selben Verhältnis größer. Man kann so zu dem Schluß kommen, daß die Säure sehr weit in das Nitrobenzol hineindiffundieren muß, bevor sie vollständig dissoziiert und daß auf diese Weise auch das Feldstärkeminimum, d. h. der Punkt gleicher Ionenkonzentrationen, weiter von der Kathode abrückt.

Es wäre nun noch auf die Meßergebnisse einzugehen, die sofort nach Umpolen der Spannung an der Kerrzelle erhalten wurden. Es ist anzunehmen, daß sich die frühere Konzentrationsverteilung noch eine gewisse Zeit hält, daß man also einen Feldstärkeanstieg von der Anode zur Kathode beobachtet. Nach kurzer Zeit hat sich allerdings die neue Konzentrationsverteilung eingestellt, so daß jetzt wieder an der Anode eine höhere Feldstärke als an der Kathode herrscht. Es ist möglich, daß man durch diese Erscheinungen beim Umpolen der Kerrzellenspannung die Beobachtungen von Ilberg (10) erklären könnte, daß nämlich einmal an der Kathode und ein anderes Mal an der Anode die höchste Feldstärke herrscht.

Zusammenfassend erkennt man, daß von einer gewissen sehr kleinen Leitfähigkeit ab, bei der die entstehenden Säuremengen so gering sind, daß sie sofort vollständig dissoziieren können, die Feldverteilung geradlinig wird. Es ist kaum anzunehmen, daß bei noch besserer Reinigung des Nitrobenzols die Feldverteilung sich ändert, da selbst bei der geringsten Konzentration der Verunreinigung sich nach obigen Überlegungen ein geradliniger Feldstärkeabfall einstellen muß. Demnach scheint es, daß man dem Verhalten des absolut reinen Nitrobenzols schon sehr nahe gekommen ist. Aus diesem Grunde kann wohl gesagt werden, daß der für Nitrobenzol gefundene sicherste Wert für die Kerrkonstante von $3{,}74 \cdot 10^{-5}$ nicht wesentlich überschritten werden dürfte.

Zum Schluß sei darauf hingewiesen, daß die oben dargelegten Anschauungen über die Art der Verunreinigung und den Mechanismus der Stromleitung nur einen Erklärungsversuch darstellen, der sich bis jetzt durch die Messungen vorliegender Arbeit stützen läßt. Es besteht natürlich wegen der Kompliziertheit der physikalischen und chemischen Vorgänge die Möglichkeit, daß die Theorie in mehreren Punkten der Änderung oder der Erweiterung bedarf.

VIII. Zusammenfassung.

Der schon früher von anderer Seite gefundene, nicht lineare Potentialabfall im Nitrobenzol ist bestätigt worden. Die Verteilung der Feldstärke im Kerrzellenspalt wurde nach drei verschiedenen Methoden untersucht. Die höchste Feldstärke herrscht immer an der Anode. Bei mehrfach unter vermindertem Druck destilliertem Nitrobenzol liegt das Feldstärkeminimum in dem Raum zwischen den Kondensatorplatten, während es bei mit Silberoxyd versetztem Nitrobenzol ganz an die Kathode gerückt ist.

Die Kerrkonstante hängt von der Art der Feldverteilung nicht ab, während sie dagegen mit kleiner werdender Leitfähigkeit größer wird.

Die großen Abweichungen in den Angaben früherer Autoren über die Größe der Kerrkonstante lassen sich erklären. Die mit Wechselstrom gefundenen Werte stimmen mit denen vorliegender Arbeit innerhalb der Meßgenauigkeit und unter Berücksichtigung der Tatsache, daß sicher sehr verschiedene Nitrobenzolsorten verwandt wurden, überein. Die mit Gleichstrom gefundenen Werte sind wegen Nichtberücksichtigung der ungleichmäßigen Feldverteilung zu klein.

Absolut reines Nitrobenzol (d. h. Leitfähigkeit Null) ließ sich nicht herstellen. Es ist aber anzunehmen, daß der bis jetzt gefundene Wert für die Kerrkonstante von

$$3{,}74 \cdot 10^{-5}$$

nicht sehr von demselben für absolut reines Nitrobenzol abweichen kann.

Die bei den Leitfähigkeitsmessungen gefundene Stoßionisation gab die Erklärung dafür, daß die Durchschlagsfeldstärke mit kleiner werdendem Abstand zunimmt und daß bei einer bestimmten Feldstärke die Leitfähigkeit ein Minimum besitzt.

Aus den Feldverteilungskurven konnten Rückschlüsse auf die Konzentrationsverteilung der Verunreinigung im Nitrobenzol und damit auf die Art der Verunreinigung gezogen werden.

Meinem hochverehrten Lehrer Herrn Professor Dr. H. G. Möller, der mir das Thema zu vorliegender Arbeit gab und in dessen Institut auch die Versuche durchgeführt wurden, möchte ich an dieser Stelle meinen Dank aussprechen für wertvolle Anregungen und für das rege Interesse, welches er mir jederzeit zur Förderung der Arbeit entgegenbrachte.

Desgleichen bin ich Herrn Professor Dr. P. P. Koch zu Dank verpflichtet für die Überlassung von Apparaten und das freundliche Entgegenkommen, welches er mir bei der Benutzung seines Registrierphotometers erwies.

Auch Herrn Dr. C. Hagen danke ich für seine freundliche Unterstützung und manchen wertvollen Ratschlag.

IX. Literaturverzeichnis.

Zusammenstellung bis 1920 bei: Szivessy, Jahrb. d. Rad. u. Elektron. **16**, 241, 1920.

1) Kerr, Phil. Mag. (5) **9**, 157, 1880.
2) Leiser, Abh. d. Bunsen-Ges. Nr. 4, 1910.
3) Des Coudres, Verh. d. Ges. Deutsch. Naturf. u. Ärzte, 65. Vers., Nürnberg, 2. Teil, 67, 1893.
4) Schmidt, Ann. d. Phys. **7**, 142, 1902.
5) Mc Comb, Phys. Rev. **29**, 525, 1909.
6) Cotton und Mouton, Journ. de Phys. (5) **1**, 5, 1911.
7) Lippmann, Zeitschr. f. Elektrochemie **17**, 15, 1911, Dissert. Leipzig 1912.
8) Lyon, Dissert. Freiburg 1914; Ann. d. Phys. (4) **46**, 783, 1915.
9) Szivessy, Zeitschr. f. Phys. **2**, 30, 1920.
10) Ilberg, Physik. Zeitschr. **29**, 670, 1928.
11) Chaumont, Ann. de Phys. (9) **4**, 61, 1915; (9) **5**, 17, 1916.
12) Bergholm, Ann. d. Phys. **51**, 414, 1916.
13) Lohaus, Physik. Zeitschr. **27**, 217, 1926.
14) Lemoine, Compt. Rend. **122**, 835, 1896.

(Eingegangen 1. Juli 1931.)

Beiträge zur Physik der Nitrobenzolkerrzelle.

I. Untersuchung der Verteilung starker elektrostatischer Felder in der Nitrobenzolkerrzelle.

Von F. Hehlgans.

(Mitteilung aus dem Forschungs-Institut der AEG.)

I. Vorliegende Versuchsergebnisse.

Lohaus[1]), Ilberg[2]), Möller[3]) und Dillon[4]) haben die Verteilung elektrostatischer Felder in der Nitrobenzolkerrzelle mit Hilfe des elektrooptischen Kerreffektes untersucht. Die Bestimmung der Feldinhomogenitäten erfolgte dabei entweder aus der Größe und Art der Deformierungen der Interferenzstreifen eines Babinetkompensators[5]) oder aus der Messung der Lichtverteilung im Raume zwischen den Elektroden des Kerrkondensators[6]).

Ilberg[7]) fand, daß sich das Streifensystem eines Babinetkompensators, das ohne Feld senkrecht zu den Elektroden des Kerrkondensators verlief, beim Anlegen einer Gleichspannung krümmte, und zwar so, daß an der Anode die größte Deformierung erfolgte, woraus zu schließen war, daß die Feldstärke stetig von der Kathode zur Anode anstieg. Dillon[1]) photographierte das Streifensystem eines Babinetkompensators mit parallelem weißem Licht bei einer mittleren Feldstärke von $\approx 1{,}5 \cdot 10^4$ V/cm. Die Ausmessung der Lichtbilder ergab einen linearen Abfall der Feldstärke von der Kathode zur Anode. An der negativen Elektrode war die Feldstärke 30 Minuten nach dem Anlegen der Gleichspannung etwa doppelt so groß wie an der Anode, während zwei Minuten nach dem Anlegen der Spannung die Feldstärke an der Kathode nur etwa den $1^1/_2$fachen Betrag der Feldstärke an der Anode erreicht hatte. Die Feldinhomogenitäten wurden also mit der Belastungsdauer größer.

Bei der Beobachtung der Aufhellung im Raume zwischen den Elektroden einer Nitrobenzolkerrzelle fand Lohaus[2]) bei Verwendung von weißem Licht und einer Feldstärke von $\approx 1{,}0 \cdot 10^4$ V/cm, daß sich an der Kathode eine schmale Zone größter Helligkeit ausbildete; das übrige Gesichtsfeld war weniger, aber annähernd gleichmäßig aufgehellt. Die größte Feldstärke befand sich also an der Kathode und zwar in einer Zone, deren Ausdehnung nur etwa 1 Proz. des Elektrodenabstandes betrug. Ilberg[3]) fand bei Verwendung von weißem Licht, daß sich bei kleinen Feldstärken das Gesichtsfeld merklich gleichmäßig aufhellte, bei weiterer langsamer Steigerung der Spannung trat zunächst an der Anode eine Rotfärbung ein, die sich vergrößerte und dann von einer blauen Zone begleitet wurde. Bei weiterer Steigerung der Spannung lösten sich immer mehr rotblaue Linien von der Anode ab, woraus auf Feldstärkenunterschiede im Kerrkondensator vom Verhältnis 1 : 2 im maximalen Falle geschlossen werden konnte. Die Feldstärke war an der Anode am größten. R. Möller[4]) photographierte ein paralleles Lichtbüschel der grünen *Hg*-Linie (5461 ÅE), das er bei Feldstärken von $\approx 9 \cdot 10^3$ bis $\approx 1{,}5 \cdot 10^4$ V/cm durch eine Nitrobenzolkerrzelle schickte. Durch Ausphotometrieren der Lichtbilder wurde festgestellt, daß die Feldstärke von der Mitte der Zelle nach beiden Elektroden zunahm. Die Feldstärke war an der Kathode am größten. Die Feldinhomogenitäten wurden mit wachsender Feldstärke kleiner. Bei einer mittleren Feldstärke von $\approx 1{,}3 \cdot 10^4$ V/cm wurde nur noch ein maximaler Feldstärkenunterschied von 10 Proz. ermittelt.

1) O. Lohaus, Physik. Zeitschr. **27**, 217, 1926.
2) W. Ilberg, Physik. Zeitschr. **29**, 670 ff., 1928, s. a. W. Ilberg, Physik. Zeitschr. **26**, 907, Z. 16 ff. v. o. 1925.
3) R. Möller, Physik. Zeitschr. **30**, 20, 1929.
4) G. J. Dillon, Zeitschr. f. Phys. **81**, 386, 1930.
5) S. dazu z. B. G. J. Dillon, a. a. O. 386.
6) S. dazu z. B. R. Möller, a. a. O. 23.
7) W. Ilberg, a. a. O. S. 673.

1) G. J. Dillon, a. a. O. S. 387.
2) O. Lohaus, a. a. O. S. 218.
3) W. Ilberg, a. a. O. S. 672.
4) R. Möller, a. a. O. S. 23.

II. Zusammenfassung und Deutung der Versuchsergebnisse.

Die Schemata der Deformierung der Babinetstreifen, die den Versuchsergebnissen von Lohaus, Ilberg, Möller und Dillon entsprechen, sind in Fig. 1 gezeichnet. Die Spalte am weitesten rechts zeigt Babinetstreifen bei elektrisch nicht belasteter Kerrzelle. Weiter ist in Fig. 1 angenommen, daß die Streifenwanderung mit wachsender Feldstärke von links nach rechts erfolgt. Nach Dillon ergibt sich ein Voreilen der

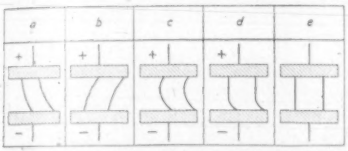


Fig. 1. Schemata der Deformierung der Babinetstreifen bei elektrostatischen Feldern nach a) Dillon, b) Ilberg, c) Möller, d) Lohaus, sowie e) Kerrzelle o. Feld.

Streifenteile, die der Kathode benachbart sind. Die Deformierung der Streifen wächst mit der Dauer der Belastung. — Nach Ilberg ist der Gang der Deformierung der Streifen genau umgekehrt wie bei Dillon, nach Ilberg eilen die Streifenteile um so mehr vor, je näher sie sich an der Anode befinden. — Nach Möller eilen die Streifen von der Mitte nach beiden Elektroden vor, und zwar ist die Voreilung an der Kathode am größten. Die Deformierung der Streifen nimmt mit wachsender Feldstärke ab. — Nach der von Lohaus gefundenen Feldverteilung endlich verschieben sich die Babinetstreifen im allgemeinen parallel zu sich selbst, nur in einem schmalen Gebiet nahe der Kathode eilen die Streifen vor.

Die Aufhellung im Gesichtsfeld der Kerrzelle nimmt nach Dillon unter Voraussetzung von monochromatischem Licht und Gangunterschieden bis $\varphi = 0{,}5$ stetig von der Kathode zur Anode ab, bei Ilberg nimmt im Gegensatz dazu die Aufhellung stetig von der Kathode zur Anode zu. Bei Möller ist das Gesichtsfeld in der Mitte am dunkelsten und wird nach beiden Elektroden zu stetig aufgehellt, die Aufhellung ist am größten an der Kathode. Nach den Untersuchungen von Lohaus endlich wird das ganze Gesichtsfeld im allgemeinen gleichmäßig aufgehellt, nur dicht an der Kathode befindet sich eine schmale Zone besonders starker Aufhellung.

Die Erklärung der inhomogenen Feldverteilung in einer mit einer Gleichspannung belasteten Nitrobenzolkerrzelle ist in dem gleichen „Polarisationseffekt" zu suchen, durch den Leiser[1]) verwandte Erscheinungen beim Schwefelkohlenstoff erklärt hat. Als Ursache für die Feldinhomogenitäten ist eine Verunreinigung der Dielektrika z. B. durch Elektrolyte anzunehmen. Bei dem Stromdurchgang durch die Kerrzelle wird die Ionenkonzentration an den Elektroden größer. Nach den Beobachtungen von Dillon, Möller und Lohaus sammeln sich die Verunreinigungen hauptsächlich an der Kathode, nach Ilberg vorwiegend an der Anode. Mit wachsender Dauer der elektrischen Belastung muß dann die Feldinhomogenität größer werden, wie Dillon beobachtet hat. Zunächst erscheint die Angabe von Möller, daß mit wachsender Feldstärke die Deformierung des Feldes abnimmt, nicht vereinbar mit der Annahme eines Polarisationseffektes, es ist aber zu beachten, daß Möller nicht in unmittelbarer Nähe der Elektroden hat messen können[2]), und gerade dort werden sich, wie z. B. die Messung von Lohaus zeigt, die Verunreinigungen sammeln. Nimmt man also an, daß sich bei Nitrobenzol ähnlich wie bei Kristallen[3]) die Polarisation in sehr dünnen Schichten ausbilden kann, so ist es erklärlich, daß nach Möller die Deformierung mit wachsender Feldstärke abzunehmen schien, da sich die unmittelbare Nachbarschaft der Elektroden der Beobachtung entzog. Nach Lohaus beträgt die Schichtdicke der Verunreinigung an den Elektroden etwa 1 Proz. des Elektrodenabstandes, Möller hat aber erst in einem Abstand von 0,2 mm von den Elektroden messen können, d. h. in etwa 5,6 Proz. des Elektrodenabstandes (3,5 mm). Ilberg fand in Übereinstimmung mit der Annahme eines Polarisationseffektes, daß die Feldstärkenunterschiede im Kerrkondensator mit wachsender Feldstärke steigen. Sehr gut stimmt die Angabe Möllers, daß bei seinen Versuchen nur eine relativ geringe Felddeformierung auftrat (10 Proz. bei $\varphi = 0{,}7$), mit der Annahme eines Polarisationseffektes überein, da Möller mit gut gereinigten und getrockneten Materialien arbeitete.

III. Stellung der Aufgabe.

So wenig einheitlich die vorliegenden Versuchsergebnisse sind, so zeigen sie doch, daß mit wachsender Reinheit des Nitrobenzols die Feldinhomogenitäten geringer werden. Die größere Reinheit einer Nitrobenzolfüllung drückt sich elektrisch u. a. in der Abnahme ihrer Leitfähigkeit aus, und soweit darüber Angaben vor-

1) R. Leiser, Abhdlg. der Bunsengesellschaft Nr. 4, S. 21, Verlag Chemie 1910, s. a. O. Lohaus, a. a. O. S. 218.

2) R. Möller, a. a. O. S. 23.

3) A. Joffé, Ann. d. Phys. **72**, 473, 1923, s. a. O. Lohaus, a. a. O. S. 218.

liegen, nehmen mit kleinerem Leitwert die beobachteten Feldinhomogenitäten ab[1]).

Es sollten deshalb die Messungen mit Nitrobenzol wiederholt werden, das nach dem heutigen Stande der Technik weitgehendst gereinigt war. Die Erfordernisse der Tonfilmaufnahmetechnik hatten zur Entwicklung eines dazu geeigneten Verfahrens geführt, über das bereits früher berichtet wurde[2]) und das sich zusammensetzt aus Filtrationen, Behandlung mit basischen Oxyden und fraktionierten Destillationen bei vermindertem Druck. Auf diese Weise gereinigtes Nitrobenzol hatte bei einer vorläufigen Untersuchung eine Verbesserung einiger seiner elektrooptischen Konstanten gezeigt.

Sowohl mit der Methode der Babinetinterferenzen als auch durch Messung der Gesichtsfeldaufhellung sollte untersucht werden, ob so gereinigtes Nitrobenzol noch merkbare Feldinhomogenitäten im Kerrkondensator erkennen ließ. Da die bisherigen Beobachtungen sich im allgemeinen nur auf Belastungen der Kerrzellen mit $\approx 1{,}5 \cdot 10^4$ V/cm maximal erstreckten, sollten sie auf Bereiche höherer Feldstärke ausgedehnt werden. Endlich sollten Versuche bei möglichst großen Belastungsdauern durchgeführt werden.

Wenn sich bei diesen Versuchen keine meßbare Deformierung des elektrischen Feldes im Kerrkondensator nachweisen ließ, so sollte versucht werden, die von anderen Autoren gefundenen Feldinhomogenitäten durch künstliche Verunreinigung des Nitrobenzols wieder hervorzurufen.

IV. Die Verteilung starker elektrostatischer Felder im Kerrkondensator bei Verwendung bestgereinigten Nitrobenzols.

1. Die optische Versuchsanordnung.

Fig. 2 zeigt den grundsätzlichen Aufbau der optischen Versuchsanordnung. Als Lichtquelle diente eine Mikroskopbandlampe der Firma Osram, Berlin ($\approx 2800^0$ abs. bei 100 Watt aufgewandter elektrischer Leistung), deren spektrale Lichtverteilung etwa dem bei der Tonfilmaufnahme verwendeteten weißen Licht entspricht. Zur Erzeugung eines annähernd parallelen Lichtbüschels wurde ein handelsüblicher Kondensator (C in Fig. 1) der Firma Carl Zeiss, Jena (Type If, $F = 4{,}7$ cm) verwandt.

Der spektrale Bereich der Lichtquelle wurde eingeengt durch Glasfilter der Firmen Schott und Lifa, deren ziemlich breiter Durchlässigkeitsbereich den hier zu stellenden Ansprüchen genügte. Meist benutzt wurden ein Lifafilter (optischer Schwerpunkt bei ≈ 5500 Å) und ein Schottfilter (optischer Schwerpunkt bei ≈ 5000 Å), die im folgenden kurz als Filter L bzw. S bezeichnet werden. Die vorwiegende Benutzung des grüngelben bzw. grünblauen Spektralbereiches des sichtbaren Lichtes erfolgte deshalb, weil die

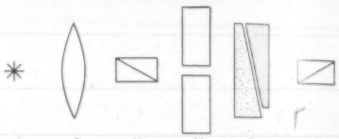


Fig. 2. Messung der Feldverteilung mittels eines Babinetkompensators.
Q Lichtquelle } erzeugen $\approx$ paralleles weißes oder
C Kondensor } monochr. Licht.
N_1 } Nikols (Polarisationsebene $\perp$ oder $//$).
N_2 }
K Kerrkondensator.
B Babinetkompensator (zur Veranschaulichung um 90^0 gedreht gezeichnet).

Änderung des Gangunterschiedes in der Kerrzelle proportional ist der Kerrkonstanten B, die ihrerseits mit abnehmender Lichtwellenlänge ansteigt.

Die Nikols N_1 und N_2 (Fig. 2) sind zwei optisch sehr vollkommene Prismen nach Glan der Fa. B. Halle, Bln.-Steglitz (Prismen kubischer Gestalt, Kantenlänge 20 mm, Öffnungswinkel $\approx 9^0$). Die Prismen waren auf Reitern montiert, eine genaue Kreisteilung auf der Fassung in Verbindung mit einer Marke gestattete eine genaue Ablesung der Drehung.

Der Babinetkompensator (von der Fa. R. Fuess, Bln.-Steglitz) war in besonders präziser Ausführung hergestellt aus optisch reinem Quarz mit genau planen Flächen. Ein Keil war freischwingend angeordnet zur Vermeidung von Spannungen. Die Steigung der Mikrometerschraube betrug 0,25 mm. Die Trommel war in 100 Teile eingeteilt. Jede volle Umdrehung konnte an einer besonderen Teilung abgelesen werden.

Als Kerrkondensatoren wurden im allgemeinen die im Forschungs-Institut der AEG für Tonfilmzwecke entwickelten Typen benutzt[1]), deren Verwendung empfehlenswert erschien, weil die Untersuchungsergebnisse in der Praxis nutzbringend angewandt werden konnten und weil diese Ergebnisse jederzeit von anderer Seite nachgeprüft werden können, da die Klangfilm G. m. b. H., derartige Kerrkondensatoren in den Handel bringt.

1) Vgl. dazu z. B. R. Möller, a. a. O. S. 24.

2) F. Hehlgans, Physik. Zeitschr. **30**, 942—946, 1929, s. a. F. Hehlgans, Physik. Zeitschr. **31**, 385, 1930.

1) Über Verwendung einer anderen Kerrzellenform s. Abschnitt IV, 3c.

Fig. 3 zeigt einen der verwendeten Kerrkondensatoren. Einzelheiten der Ausführung sind in dem in der Fußnote angeführten Aufsatz des Verfassers nachzulesen[1]). Als Elektrodenmaterial wurde Reinnickel verwandt, die Elektrodenabstände betrugen je nachdem $a = 0{,}01$ bis 0,35 cm, bei einer Ausdehnung der Elektroden von $L = 0{,}5$ cm in Richtung des Lichtweges und einer Spaltbreite b von 1,0 bis 4,1 cm. Bei der

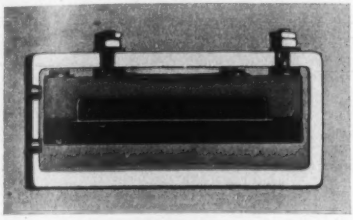


Fig. 3. Tonfilmkerrkondensator.

Herstellung sind für den Elektrodenabstand a und die Lichtweglänge L einseitige Toleranzen von $-5\,\mu$ für a bzw. $-20\,\mu$ für L vorgeschrieben.

Die photographischen Aufnahmen erfolgten mit einem Zeiss-Tessar $1:3{,}5$, $f = 15$ cm. Das Bild eines Fädchens, das in der Führung der Kassetten der Photoplatten eingespannt war, diente als Bezugsmarke für die Lichtbildaufnahmen. Die gesamte optische Anordnung war auf einer optischen Bank von etwa 2 m Länge aufgebaut.

2. Der rein elektrische Teil der Versuchsanordnung.

Als Spannungsquellen wurden entweder die Hausbatterie ($1{,}5 \cdot 10^3$ V) oder, wenn deren Spannungsbereich nicht ausreichte, Gleichrichter bis $5 \cdot 10^3$ V mit gut geglätteter Spannung verwendet.

Schutzwiderstände zur Begrenzung des durch die Kerrzelle fließenden Stromes, wie sie in der Größenordnung von $1 \cdot 10^6$ Ohm von den oben genannten Autoren verwandt wurden, brauchten bei den Untersuchungen mit guten Tonfilmkerrzellen wegen ihrer großen elektrischen Festigkeit nicht verwendet zu werden. Die Kerrkondensatoren konnten unmittelbar an die Spannungsquelle gelegt werden, und es war auch nicht notwendig, die Spannungen langsam zu steigern, vielmehr konnten die Zellen ruckweise an- und abgeschaltet werden.

1) F. Lichte-Fischer, Tonfilmaufnahme und Wiedergabe nach dem Klangfilmverfahren, Abschnitt B, II, 1. (S. 10—39). Verlag Hirzel, Leipzig 1931.

Als Spannungsmesser dienten ein Multizellularvoltmeter der Fa. Hartmann u. Braun (bis $1{,}5 \cdot 10^3$ V) und ein weiteres gleichfalls elektrostatisches Instrument der gleichen Firma mit einem Meßbereich bis $5 \cdot 10^3$ V.

3. Messung der Verteilung des elektrostatischen Feldes im Kerrkondensator mittels Babinetstreifen.

a) Versuchsergebnisse bei wachsender Feldstärke.

Die Deformierung der Babinetstreifen muß mit wachsender Feldstärke F größer werden, wie z. B. die oben aufgeführten Untersuchungen von Ilberg gezeigt hatten. Wenn überhaupt eine Felddeformierung bei den untersuchten Tonfilmkerrzellen meßbar vorhanden war, so mußte sie sich demnach am ehesten zeigen, wenn das Material bis zur Grenze der Durchbruchsfeldstärke beansprucht wurde. Diese liegt etwa bei $1{,}5 \cdot 10^5$ V/cm bei bestgereinigtem Nitrobenzol[1]).

Die Lichtbilder a bis i von Fig. 4 wurden mit weißem Licht bei gekreuzten Nikols aufgenommen. Der zeitlichen Reihenfolge der Aufnahmen entspricht ihre alphabetisch fortschreitende Bezeichnung. Die zugehörigen Feldstärken sind in der Tab. I zusammengestellt. Bei der Aufnahme h betrug der Gangunterschied des optischen Schwerpunktes des weißen Lichtes $\approx 1{,}1$ Lichtwellenlängen λ.

Tabelle I.

Laufende Nr.	Feldstärke V/cm	Laufende Nr.	Feldstärke V/cm
a	0	f	$5{,}00 \cdot 10^4$
b	$1{,}362 \cdot 10^4$	g	$5{,}91 \cdot 10^4$
c	$2{,}27 \cdot 10^4$	h	$6{,}82 \cdot 10^4$
d	$3{,}18 \cdot 10^4$	i	0
e	$4{,}08 \cdot 10^4$		

Bei den Lichtbildern von Fig. 4 und den folgenden wurden immer zu Beginn und am Ende einer Serie von Aufnahmen je eine Aufnahme ohne elektrische Belastung der Kerrzelle gemacht, deren Übereinstimmung die Konstanz der Versuchsbedingungen bewies.

Das Bild der Einstellmarke (s. Abschnitt IV, 1) befindet sich in der Aufnahme a von Fig. 4 etwa in der Mitte des Nullstreifens des Babinetkompensators[2]), d. h. desjenigen Streifens, für den die Phasendifferenz Null ist. Nach Anlegen des elektrostatischen Feldes wandert in den Auf-

1) F. Hehlgans, Physik. Zeitschr. **30**, 942—946, 1929.

2) S. dazu Kohlrausch, Lehrb. d. prakt. Phys., 15. Auflage, S. 406, 1927.

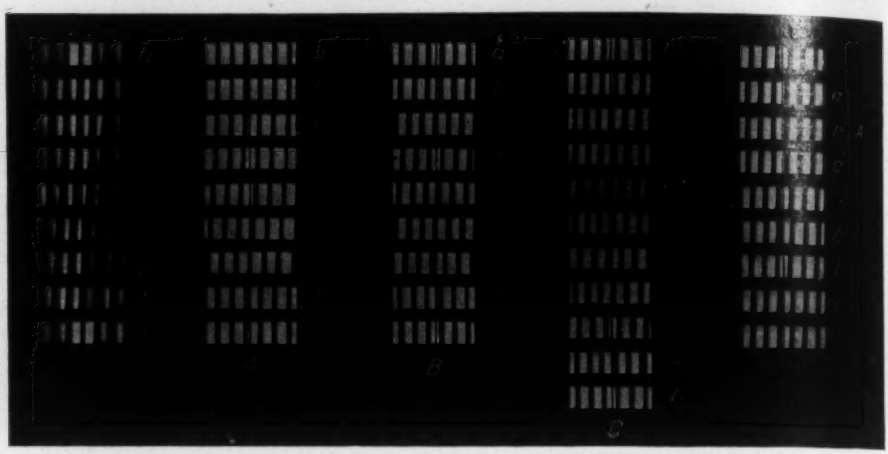


Fig. 4. Wanderung der Babinetstreifen bei elektrostatischen Feldern bis $\approx 7 \cdot 10^4$ V/cm (w. Licht).

Fig. 5. Streifenverschiebung bei elektrostatischen Feldern bis zur Durchbruchsfeldstärke ($\approx 15{,}0 \cdot 10^4$ V/cm, $\approx$ monochrom. Licht).

Fig. 6. Babinetstreifen bei Dauerbelastung des Kerrkondensators mit starken elektrostatischen Feldern ($\approx$ monochrom. Licht).

nahmen *b*—*h* der Nullstreifen von rechts nach links von der Einstellmarke fort, in der Aufnahme *h* ist der dem Nullstreifen benachbarte Streifen um etwa den halben Betrag seiner Breite über die Einstellmarke hinaus gewandert. Die Streifenverschiebungen wurden durch Ausmessen des optisch vergrößerten Bildes der Aufnahmen annähernd ermittelt. Auf eine genaue Ermittlung des absoluten Betrages der Streifenverschiebung konnte bei dieser und den folgenden Aufnahmen verzichtet werden, da es im vorliegenden Falle nicht so sehr auf diese Größe ankommt als vielmehr auf die Feststellung, daß die Streifen sich parallel zu sich selbst verschieben. Das ist der Fall, wie z. B. der Vergleich der Lichtbilder *h* und *i* von Fig. 4 zeigt; die Parallelität ist bei dieser und den folgenden Aufnahmen durch Komparatorausmessung mit einer Genauigkeit von 2 Proz. sicher gestellt.

Prüfungen der Einstellung des Nullstreifens, die nur mit weißem Licht erfolgen können, sind im weiteren Verlauf der Untersuchung stets unternommen worden. Dagegen wurden alle folgenden Lichtbildaufnahmen bei gefiltertem Licht gemacht, weil bei Verwendung von weißem Licht nur der Nullstreifen schwarz ist, während die folgenden Streifen farbige Ränder zeigen und sich stark verbreitern (s. Fig. 4), was bei den hier vorkommenden großen Gangunterschieden unerwünscht ist.

Die Lichtbilder *A* bis *C* von Fig. 5 zeigen drei Aufnahmereihen mit dem Filter *L*, die im übrigen in der gleichen Weise erhalten wurden, wie die in Fig. 4. Die zu Fig. 5 gehörigen Feldstärken sind in der Tab. II aufgeführt. Auch hier verschieben sich die Streifen parallel zu sich selbst. Bei den Lichtbildern *Ah*, *Bh* und *Ch* wurden Gangunterschiede vom annähernden Betrage 1 λ; 2,1 λ und 4,5 λ erreicht. Die zu den einzelnen Aufnahmen *A* bis *C* gehörigen Feldstärken überlappen sich und erreichen bei der Aufnahme *Ch* eine Höhe von $15{,}0 \cdot 10^4$ V/cm, wie die Tab. II zeigt.

Tabelle II.

Laufende Nr.	Feldstärke in V/cm Aufnahme A	Feldstärke in V/cm Aufnahme B	Feldstärke in V/cm Aufnahme C
a	0	0	0
b	$1{,}362 \cdot 10^4$	$2{,}50 \cdot 10^4$	$3{,}6 \cdot 10^4$
c	$2{,}27 \cdot 10^4$	$5{,}42 \cdot 10^4$	$5{,}0 \cdot 10^4$
d	$3{,}18 \cdot 10^4$	$7{,}50 \cdot 10^4$	$8{,}5 \cdot 10^4$
e	$4{,}08 \cdot 10^4$	$8{,}33 \cdot 10^4$	$9{,}3 \cdot 10^4$
f	$5{,}00 \cdot 10^4$	$9{,}16 \cdot 10^4$	$11{,}0 \cdot 10^4$
g	$5{,}91 \cdot 10^4$	$10{,}00 \cdot 10^4$	$12{,}0 \cdot 10^4$
h	$6{,}82 \cdot 10^4$	$10{,}82 \cdot 10^4$	$13{,}0 \cdot 10^4$
i	0	0	$14{,}1 \cdot 10^4$
k	—	—	$15{,}2 \cdot 10^4$
l	—	—	0

Es soll hier auf eine ins einzelne gehende Anführung der zahlreichen photographischen Auf-

nahmen verzichtet werden. Immer zeigte es sich, daß bei Verwendung von bestgereinigtem Nitrobenzol die Babinetinterferenzstreifen sich parallel zu sich selbst verschoben, auch wenn die Beanspruchung der Zellen bis an die Grenze der Durchschlagsfestigkeit fortgesetzt wurde. Es konnten bei Verwendung des guten Materials keine Feldinhomogenitäten in der Nitrobenzolkerrzelle beobachtet werden.

b) Versuchsergebnisse bei elektrischer Dauerbelastung des Kerrkondensators.

Die Versuche von Dillon[1]) hatten ergeben, daß die Deformierung der Babinetstreifen mit der Dauer der Beanspruchung größer wurde. Die analoge Untersuchung des Verfassers mit gereinigtem Nitrobenzol und den mit höchster Sauberkeit und Präzision hergestellten Kerrzellen für Tonfilmaufnahmezwecke ergaben, daß diese auch bei längerer Dauerbelastung keine Deformierung der Babinetstreifen zeigten.

Als Beispiele sind die Versuchsreihen *A* und *B* von Fig. 6 hier wiedergegeben. Vor Beginn und nach Beendigung jeder der Aufnahmeserien *A* und *B* sowie am Schluß der ganzen Doppelreihe wurden die mit *O* bezeichneten Lichtbilder ohne elektrische Belastung aufgenommen. Nach einmaliger Einstellung der Spannung wurde an der Anordnung nichts mehr geändert; es wurden in den angegebenen Zeitabständen (5—60 Minuten) die Aufnahmen *Aa* bis *Ac* bzw. *Ba* bis *Bc* bei Dauerbelastung der Zellen gemacht. Eine Deformierung der Streifen ist nicht erkennbar[2]).

Die Tab. III gibt die Feldstärken, und die jeweilige Belastungsdauer zu den Lichtbildern von Fig. 6 an. Die Gangunterschiede betrugen bei der Reihe $A \approx 0{,}25\ \lambda$ und $\approx 1{,}0\ \lambda$ bei der Reihe *B*.

Tabelle III.

Nr.	Feldstärke V/cm	Belastungszeit, Min.	Nr.	Feldstärke V/cm	Belastungszeit, Min.
O	0	0	*O*	0	0
Aa		5	*Ba*		5
Ab	$3{,}03 \cdot 10^4$	30	*Bb*	$6{,}82 \cdot 10^4$	30
Ac		60	*Bc*		60
O	0	0	*O*	0	0

Aufnahmen nach Art von Fig. 6 wurden bei verschiedenen Feldstärken und Belastungszeiten bis zu etwa 2 Stunden gemacht. Es konnte bei Verwendung von gut gereinigten Materialien keine Deformierung der Babinetstreifen mit wachsender Belastungsdauer beobachtet werden.

Die angegebenen Belastungszeiten sind ziemlich kurz. Eine erwünschte Ergänzung der Versuche brachte deshalb der Umstand, daß aus den Tonfilmaufnahmebetrieben Kerrzellen regelmäßig zur Prüfung zurückgelangten, die bis zu 5 Monaten täglich 10—15 Stunden mit Feldstärken von etwa $3—4{,}5 \cdot 10^4$ V/cm belastet worden waren. Ein Teil von diesen Zellen zeigte ebenfalls keine Deformierung der Babinetstreifen, und zwar waren das alles Zellen, deren Füllung nicht verunreinigt war und die ihren hohen Eigenwiderstand bewahrt hatten. Also auch bei derartig langen Beanspruchungsdauern konnte keine Deformierung der Babinetstreifen beobachtet werden, solange das Kerrmedium einwandfrei geblieben war.

c) Versuchsergebnisse bei Vergrößerung der Lichtweglänge *L* im Kerrkondensator.

Die Änderung des Gangunterschiedes und damit auch die Deformierung der Babinetstreifen muß gemäß der Kerrschen Formel außer mit der Kerrkonstanten *B* und der Feldstärke *F* auch linear mit dem Lichtweg *l* im Kerrkondensator ansteigen. Dieser mit *l* bezeichnete Lichtweg ist der sogenannte „korrigierte" Lichtweg, durch den bereits Streufelder an den Elektrodenrändern berücksichtigt werden[1]). Dieser Lichtweg *l* und die in Zentimeter gemessene Länge *L* der Elektroden des Kerrkondensators in Richtung des Lichtweges unterschieden sich nur durch ein additives Glied, dessen Größe hier zu vernachlässigen ist, so daß hier statt des Lichtweges *l* unmittelbar der Lichtweg *L* gesetzt wird.

Da bei den verwendeten Tonfilmkerrzellen $L = 0{,}5$ cm war, blieb noch die Möglichkeit offen, daß sich wegen dieser geringen Ausdehnung der Elektroden die Felddeformierung der Beobachtung entzogen hatte. Die Wahrscheinlichkeit, daß infolge eines derartig kurzen Lichtweges (0,5 cm) die Felddeformierung sich nicht merkbar zeigte, war zwar sehr gering, weil schon Lohaus[2]) mit einem zehnmal so kurzen Lichtweg ($5 \cdot 10^{-2}$ cm) große Feldinhomogenitäten festgestellt hatte. Um diese Frage zu klären, wurde eine Spezialkerrzelle hergestellt, die in einem Glasrohr mit parallelen Endflächen zwei planparallele Plattenelektroden von 4×20 cm² Fläche enthielt, deren Abstand von 0 bis etwa 3,5 mm stetig verändert werden konnte. Der Lichtweg *L* in dieser Zelle betrug 20 cm, also das Vierzigfache des Betrages des Lichtweges in den Tonfilmkerrzellen. Diese

1) G. J. Dillon, a. a. O.

2) Bei der Aufnahme *Bb*, die unter Verwendung eines Gleichrichters gemacht wurde, registrierten die Spannungsmesser eine Überspannung des verwandten 50 ~ Wechselstromnetzes, diese zeigt sich sofort in einer Streifenverschiebung in der Aufnahme *Bb*, was aber hier unwesentlich ist.

1) A. Chaumont, Ann. de phys. (9) **5**, 31, 1916.

2) O. Lohaus, a. a. O. 218.

Zelle wurde mit bestgereinigtem Nitrobenzol gefüllt und elektrischen Belastungen bis an die Grenze der Durchschlagsfestigkeit unterworfen. Auch bei dieser Zelle konnten keine Deformierungen der Babinetstreifen beobachtet werden. Ebenso zeigte sich in dem angewandten Bereich von 0,1 bis 3,5 mm keine Einwirkung des Elektrodenabstandes auf die Ausbildung und Verschiebung der Interferenzen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen der Abschnitte IV, 3a—3c lassen sich dahin zusammenfassen, daß bei Anwendung von bestgereinigtem Nitrobenzol weder bei wachsender Feldstärke noch bei längeren Belastungsdauern nach der Methode der Babinetinterferenzen Feldinhomogenitäten festgestellt werden konnten. Dieser Befund bedeutet eine Bestätigung der wohl zum ersten Male von Möller[1]) geäußerten Vermutung, daß die ungleichmäßige Feldverteilung in der Nitrobenzolkerrzelle durch Reinigung des Kerrmediums beseitigt werden könnte.

4. Messung der Feldverteilung aus der Gesichtsfeldaufhellung des Kerrkondensators.

Der rein elektrische Teil der Versuchsanordnung wurde im Abschnitt IV, 2 beschrieben, ebenso wurden im Abschnitt IV, 1 die verwandten optischen Instrumente aufgeführt. Aus Fig. 2 folgt der wesentliche Teil der Versuchsanordnung, wenn der Babinetkompensator entfernt wird.

Die Beobachtungsweise entsprach der von Möller und Ilberg (s. Abschnitt I). Einmal wurde das durch die Kerrzelle hindurchtretende parallele Licht ohne Zwischenschaltung von Linsen unmittelbar auf eine Mattscheibe bzw. Photoplatte geworfen (Möller). Außerdem wurden Beobachtungen in der Weise unternommen, daß das Bild des Kerrzellenspaltes vergrößert auf dieser Mattscheibe (bzw. Photoplatte) abgebildet wurde (Ilberg).

Da die Gesichtsfeldaufhellung nur auf Gleichmäßigkeit geprüft werden sollte, genügte zu diesen Beobachtungen das vordem angewandte weiße bzw. wenig gefilterte Licht; ja diese Lichtarten hatten hier noch den Vorteil, daß sich wegen der Dispersion des Kerreffektes schon bei der visuellen Beobachtung Ungleichmäßigkeiten der Aufhellung wesentlich stärker hätten zeigen müssen als bei Verwendung homogenen monochromatischen Lichtes. Wegen der rein qualitativen Prüfung konnten außerdem die Nikols sowohl in gekreuzter als auch in paralleler Stellung verwandt werden; denn im Gegensatz zu der Möllerschen Untersuchung brauchten hier keine Lichtvergleichsmarken gezogen zu werden, und es erübrigte sich auch, das Gesichtsfeld der Nikols durchzuphotometrieren, da es nur darauf ankam, zu untersuchen, ob im Einklang mit den Beobachtungen von Abschnitt IV, 3 das Gesichtsfeld des Kerrkondensators in der Feldrichtung gleichmäßig aufgehellt wurde.

Die auf Grund der Untersuchungen des Abschnittes IV, 3 vermutete gleichmäßige Gesichtsfeldaufhellung konnte bei Verwendung von bestgereinigtem Nitrobenzol visuell und mittels Durchphotometrierung von Lichtbildern sowohl bei wachsender Feldstärke, als auch bei Dauerbelastung bei den verwandten Kerrzellen mit langem und kurzem Lichtweg L bestätigt werden. Die Größe der verwandten Feldstärken sowie die Belastungszeiten waren die gleichen wie in den Abschnitten IV, 3a und 3b.

Es soll hier noch auf einige Besonderheiten der Methode der Gesichtsaufhellung hingewiesen werden. Der Lichtweg L in den Kerrkondensatoren ist sehr groß im Vergleich mit dem Abstand a der planparallelen Elektrodenplatten, außerdem müssen die Elektrodenflächen im Interesse vollkommener Sauberkeit auf Hochglanz poliert werden. Diese Form des Lichtweges im Kerrkondensator gibt bei Verwendung parallelen Lichtes oft Veranlassung zu störenden Interferenzerscheinungen, die besonders stark bei der Möllerschen Methode in der Elektrodennähe zu beobachten sind, worauf auch Möller[1]) hingewiesen hat. Daß derartige Interferenzen tatsächlich rein optisch und nicht durch wechselnde elektrische Doppelbrechung zu erklären sind, davon kann man sich leicht durch Vergleichsaufnahmen mit parallelen Nikols und elektrisch unbelasteter Kerrzelle überzeugen. Die auftretenden Interferenzstreifen sind dann nach Lage und Ausdehnung die gleichen wie bei elektrisch belasteter Kerrzelle.

Ein Nachteil der Möllerschen Methode ist es auch, daß es bei ihr notwendig ist, Schwärzungen punktweise durchzuphotometrieren, die in der Meßrichtung höchstens wenige Millimeter breit sind (nämlich gleich dem Abstand der Elektroden). Die genaue Durchphotometrierung ist deshalb auch bei Anwendung von Präzisionsphotometern (Zeiss, Koch-Goos) schwierig, außerdem muß zu jeder Aufnahmereihe die Steilheit genau ermittelt werden, zu der die Platten entwickelt werden, um aus den Schwärzungen rückwärts die Lichtintensitäten und damit die Feldinhomogenitäten quantitativ ermitteln zu können.

Bei Beobachtung der Gesichtsfeldaufhellung mit Hilfe von weißem Licht schlägt infolge der

1) R. Möller, a. a. O. S. 24, Zeile 14ff.

1) R. Möller, a. a. O. S. 23.

Dispersion des Kerreffektes die Farbe des austretenden Lichtes mit wachsender Feldstärke mehrfach um. Bei bestgereinigtem Nitrobenzol erscheint dabei das ganze Gesichtsfeld immer gleichmäßig mit der gerade sich ergebenden Mischfarbe aufgehellt; es treten die von Ilberg[1]) beobachteten Streifen gleicher Feldstärke nicht auf, solange das Nitrobenzol rein ist.

In Fig. 7 ist als Beispiel eines Versuchs zur quantitativen Feststellung der Gesichtsfeldaufhellung die dafür maßgebende Schwärzung S

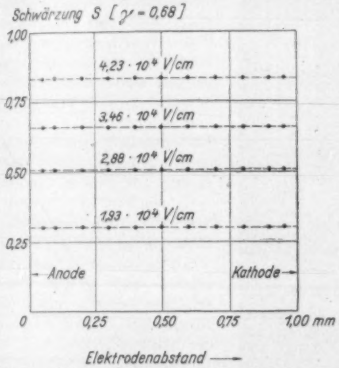


Fig. 7. Lichtverteilung im Gesichtsfeld des Kerrkondensators bei elektrostatischen Feldern (w. Licht).

einer Serie von Aufnahmen als Ordinate über dem Elektrodenabstand als Abszisse aufgetragen, bezogen auf eine Steilheit der Gradationskurve vom Betrage 0,68. Die Aufnahmen wurden mit gekreuzten Nikols und mit weißem Licht für Gangunterschiede bis zum Betrage $\varphi = 0{,}5$ bei den in Fig. 7 vermerkten Feldstärken gemacht. Wie die durch Photometrierung gewonnenen Meßpunkte zeigen, ist die Schwärzung und damit die Gesichtsfeldaufhellung sehr gleichmäßig über der Spaltbreite verteilt.

Der Vergleich der Methode der Babinetstreifen mit der Aufhellungsmethode lehrt, daß diese für quantitative Versuche weniger geeignet ist als die erstgenannte. Deshalb wurde hier auch auf weitere bildliche und tabellenmäßige Wiedergabe von Versuchsergebnissen verzichtet[2]). Die Methode der Gesichtsfeldaufhellung ist vorteilhaft bei schnellen qualitativen Prüfungen.

V. Die Verteilung elektrostatischer Felder im Kerrkondensator bei Verwendung verunreinigten Nitrobenzols.

Im Abschnitt IV wurde gezeigt, daß bei Verwendung bestgereinigten Nitrobenzols keine Deformation elektrostatischer Felder im Kerrkondensator beobachtet werden konnte. Damit war die Hauptaufgabe dieser Arbeit gelöst. Es blieb noch übrig, den Nachweis zu erbringen, daß die Felddeformationen bei Verunreinigungen des Kerrmediums wieder meßbar auftraten.

Die planmäßige Verunreinigung des Nitrobenzols erwies sich als ziemlich schwierig hinsichtlich der Dosierung der verunreinigenden Stoffe. Geringe Zusätze von Säuren und Basen, die als Lieferanten der verunreinigenden Kationen und Anionen ausersehen waren, genügten in den meisten Fällen, um den Zusammenbruch der statischen Felder herbeizuführen. Zwei Maßnahmen nämlich: Vorentladungen im Kerrkondensator infolge elektrischer Überlastung und Stehenlassen des Nitrobenzols an freier feuchter Luft ergaben dann die zur Felddeformierung notwendigen Verunreinigungen des Mediums.

Beim Stehenlassen an feuchter Luft erfolgte die Verunreinigung augenscheinlich außer durch schwebende Partikel vor allem durch die starke hygroskopische Wirkung des Nitrobenzols bei den Vorentladungen durch chemische Zersetzung im Medium. Unter Vorentladungen ist dabei die Erscheinung zu verstehen, daß bei geringer elektrischer Überlastung eines flüssigen Dielektrikums Überschläge erfolgen, die nicht zu einem ständigen Durchbruch in der Entladungsstrecke führen.

Die Lichtbildaufnahmen *a* bis *l* von Fig. 8 zeigen die Deformierung der Babinetstreifen bei Verwendung eines Kerrkondensators der kurzzeitig einem elektrostatischen Felde von $\approx 1{,}6 \cdot 10^5$ V/cm unterworfen worden war und dabei Vorentladungen gezeigt hatte. Die Aufnahmen *a* und *l* erfolgten ohne Feld, die Feldstärken zu den Lichtbildern *b* bis *k* sind in der beigefügten Tab. IV aufgeführt. Verwandt wurde das Filter *S*.

Tabelle IV.

Laufende Nr.	Feldstärke V/cm	Laufende Nr.	Feldstärke V/cm
a	0	*g*	$11{,}0 \cdot 10^4$
b	$2{,}0 \cdot 10^4$	*h*	$12{,}5 \cdot 10^4$
c	$4{,}0 \cdot 10^4$	*i*	$14{,}0 \cdot 10^4$
d	$6{,}0 \cdot 10^4$	*k*	$15{,}0 \cdot 10^4$
e	$8{,}0 \cdot 10^4$	*l*	0
f	$9{,}4 \cdot 10^4$		

Fig. 8 zeigt, daß bei einem derartig behandelten Kerrkondensator die Streifenverschiebung zunächst noch merkbar parallel mit wachsender Feldstärke erfolgte. Bei höheren Feldstärken werden die Konturen der Streifen verwischt und die Streifen werden deformiert, in Fig. 8 eilen sie an der Anode vor, was dem Fall *b* von Fig. 1 entspricht.

1) Ilberg, a. a. O. 672.
2) S. jedoch Abschnitt V und Fig. 10.

Je häufiger ein Kerrkondensator elektrisch überlastet wurde, bei um so niedrigeren Feldstärken wurden die Babinetstreifen deformiert. Empfehlenswert erwies es sich bei diesen Beobachtungen, den Spalt des Kerrkondensators

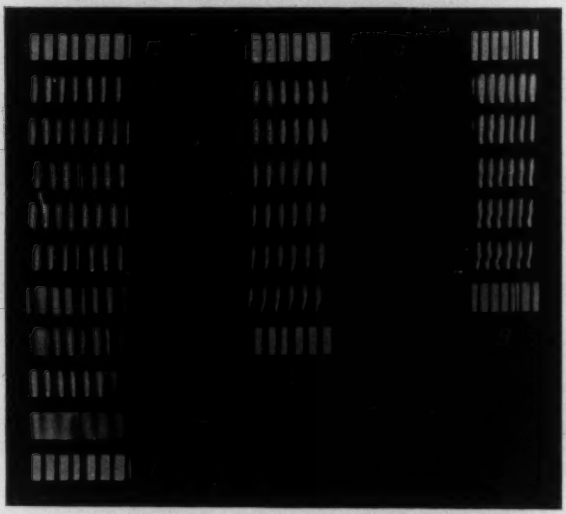


Fig. 8. Deformierung der Babinetstreifen nach elektrischer Überlastung eines Kerrkondensators.

Fig. 9. Felddeformationen bei verunreinigtem Nitrobenzol bis zum Moment des Durchschlages (Aufnahme 9 *Bf*).

senkrecht, also in die Richtung des Schwerefeldes der Erde zu stellen, da die schwebenden Verunreinigungen stets die Neigung zeigten, dem Erdfelde zu folgen, so daß sich stets an der „erdnahen" Elektrode am leichtesten der Deformationseffekt zeigte. Durch die Verbindung von elektrischer Überlastung mit der Einwirkung von feuchter Luft konnten alle Deformierungseffekte reproduziert werden, die von anderen Autoren früher beobachtet wurden (s. Fig. 1). Fig. 9 (*A* und *B*) zeigten derartige Aufnahmen. Auch die von Dillon beobachtete Vergrößerung der Deformierung mit wachsender Belastungsdauer konnte nachgewiesen werden. In der Tab. V sind die bei der Aufnahme von Fig. 9 *A* und 9 *B* verwandten Feldstärken aufgezeichnet.

Tabelle V.

Laufende Nr.	Feldstärke (9 *A*) V/cm	Feldstärke (9 *B*) V/cm
a	0	0
b	$0{,}24 \cdot 10^4$	$4{,}4 \cdot 10^4$
c	$0{,}32 \cdot 10^4$	$4{,}8 \cdot 10^4$
d	$0{,}40 \cdot 10^4$	$5{,}2 \cdot 10^4$
e	$0{,}48 \cdot 10^4$	$5{,}6 \cdot 10^4$
f	$0{,}56 \cdot 10^4$	$6{,}0 \cdot 10^4$
g	$0{,}64 \cdot 10^4$	0
h	0	

Endlich wurde die Felddeformierung auch aus der Gesichtsfeldaufhellung beurteilt. Bei annähernd monochromatischem Licht zeigte sich dabei eine ungleichmäßige Verteilung der Lichtintensität, die den Deformierungen der Babinetstreifen entsprach. Bei Verwendung von weißem Licht erfolgte der Farbumschlag im Kerrkondensator nicht mehr gleichzeitig im ganzen Gesichtsfeld, sondern es zeigte sich die von Ilberg beschriebene Erscheinung der Ablösung von Linien gleicher Feldstärke. Diese Erscheinungen erfolgten entsprechend den zugehörigen Deformierungen der Babinetstreifen.

Fig. 10 (*a* bis *e*) zeigt die Änderung der Lichtverteilung im Gesichtsfeld eines Kerrkondensators mit wachsender Verunreinigung des Nitrobenzols (w. Licht). Der Richtung von oben nach unten in Fig. 10 entspricht die Feldrichtung ($\approx 4 \cdot 10^4$ V/cm). Wegen der zur Aufnahme not-

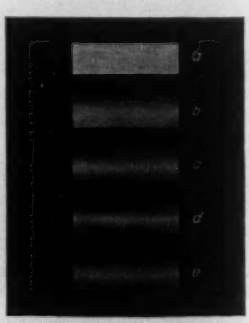


Fig. 10. Lichtverteilung im Gesichtsfeld des Kerrkondensators (w. Licht).
a reines Nitrobenzol, *b*—*e* verunreinigtes Nitrobenzol.

wendigen starken Vergrößerung wurde das Bild der Elektroden durch Blenden seitlich begrenzt. Fig. *a* (bestgereinigtes Nitrobenzol) zeigt eine gleichmäßige Aufhellung in der Feldrichtung. Mit wachsender Verunreinigung des Nitrobenzols (Fig. 10 *b* bis *e*) wird bei der gleichen Kerrzellenspannung wie in der Aufnahme *a* die Gesamtaufhellung im Raume zwischen den Elektroden geringer, außerdem bilden sich zunächst an der Anode (Fig. 10 b), dann aber auch an der Kathode (Fig. 10 c bis e), farbige Zonen aus, die sich in dem Schwarzweißbild als Streifen bemerkbar machen. (Die Belichtungszeiten waren bei dem auf der gleichen Platte hergestellten Aufnahmen die gleichen.)

VI. Zusammenfassung und Bedeutung der Versuchsergebnisse für die Physik und Technik der Nitrobenzolkerrzelle.

1. Die Annahme, daß die von anderen Autoren beobachtete Inhomogenität elektrostatischer Felder in der Nitrobenzolkerrzelle durch Verunreinigungen hervorgerufen wurde, fand auf zweierlei Art und Weise ihre Bestätigung. Einmal konnte Nitrobenzol so weit gereinigt werden, daß keine Felddeformierung mehr festgestellt werden konnte. Andererseits konnten die Deformationen durch künstliche Verunreinigung des Nitrobenzols wieder hervorgerufen werden. Die Beobachtungen erfolgten bei elektrischen Feldern bis an die Grenze der Durchschlagsfestigkeit bestgereinigten Nitrobenzols ($1{,}5 \cdot 10^5$ V/cm) und bei langen Belastungsdauern.

2. Die Versuchsergebnisse zeigen, daß es sehr wohl physikalisch berechtigt ist, eine Bestimmung der Kerrkonstanten des Nitrobenzols bei Anwendung von elektrostatischen Feldern durchzuführen, was von einigen Autoren auf Grund der beobachteten Felddeformationen bisher ausdrücklich verneint wurde[1]). Voraussetzung ist natürlich dabei, daß das Nitrobenzol so gut gereinigt wurde, daß keine Felddeformierungen mehr feststellbar sind. Man darf geradezu sagen, daß eine Bestimmung der Kerrkonstanten des Nitrobenzols nach einer beliebigen Methode erst dann Zweck hat, wenn zuvor festgestellt worden ist, daß keine merkbaren vorhanden sind.

3. Endlich folgt aus den Versuchsergebnissen eine praktisch brauchbare, optische Materialprüfungsmethode für Nitrobenzol und ähnliche Stoffe, die es gestattet, die Reinheit der Stoffe sowohl aus der Gestalt und Verschiebung der Babinetinterferenzstreifen, als auch aus der gleichmäßigen Aufhellung des Gesichtsfeldes des Kerrkondensators zu beurteilen.

1) S. dazu W. Ilberg, Physik. Zeitschr. **26**, 907, 1925; **29**, 673, 1928; Zeitschr. f. techn. Phys. **11**, 282, 1930; G. J. Dillon, a. a. O.

(Eingegangen 3. Juli 1931.)

Eine Apparatur für ballistische Ringmessungen bei höheren Temperaturen.

Von Heinrich Kühlewein und Hans Neumann.

(Mitteilung aus dem Forschungslaboratorium des Siemens-Konzerns.)

Für die Erforschung des Ferromagnetismus in physikalischer wie auch in technischer Hinsicht ist die Kenntnis aller magnetischen Größen bei höheren Temperaturen — bis über den Umwandlungspunkt hinaus — von großer Wichtigkeit. Eine Bestimmung des Curiepunktes allein kann für die Erkenntnis nicht als ausreichend angesehen werden. Bei den bisher zu diesem Zwecke verwendeten Apparaturen, die mit offenen Magnetkreisen arbeiten, wird — besonders bei Verwendung magnetisch weicher Materialien — die Genauigkeit der Meßresultate durch zu große Entmagnetisierungsfaktoren erheblich beeinträchtigt[1]).

Die im übrigen verwendeten ballistischen Ringmethoden, bei denen ja eine Scherung der Feldstärke fortfällt, haben den Übelstand, daß bei indirekter Heizung durch einen Ofen[2]) zwei Wicklungen (Magnetisierungs- und Induktionswicklung) aufgebracht werden müssen bzw. bei direkter Heizung noch eine dritte, die Heizwicklung[3]). Die Herstellung der Wicklungen ist außerordentlich zeitraubend und kostspielig, außerdem macht die Isolation der Induktionswicklung bei höheren Temperaturen besondere Schwierigkeiten.

Wir haben uns daher die Aufgabe gestellt, für die Messung magnetisch weicher Materialien — bis zu Temperaturen von etwa 950° C — eine einfache und zuverlässige Apparatur zu bauen, die nur das Aufbringen einer einzigen Wicklung (der Induktionswicklung) erfordert. Als Magnetisierungswicklung wurden wieder die schon in einer früheren Arbeit[4]) erwähnten koaxialen Messingrohre verwendet, die nach Überstreifen der Ringprobe durch wenige Handgriffe zusammengeschaltet werden können.

Ein jedesmaliges Aufbringen der Heizwicklung wurde durch Verwendung von vier getrennten toroidförmigen Heizspulen vermieden, die sich der Form der Ringprobe anpassen, wie weiter unten beschrieben werden wird.

1) Vgl. hierzu insbesondere H. Neumann: Über ballistische Messungen an hochpermeablen Materialien. Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus dem Siemens-Konzern. **10**, Heft 2, S. 55, 1931.

2) H. A. Rowland, Phil. Mag. **48**, 321, 1874. I. Hopkinson, Phil. Transact. Royal Soc. of London **180**, 443, 1889.

3) Vgl. D. K. Morries, Phil. Mag. Serie 5, **44**, 213, 1897.

4) H. Neumann, l. c. S. 66.

Die ballistische Meßmethode ist im übrigen die übliche. Da die zur Verfügung stehenden Blechringe im allgemeinen einen äußeren Durchmesser von 60 mm und einen inneren von 45 mm besaßen, bestand die Aufgabe, in dieser relativ kleinen Ringöffnung außer den zentralen Leitern eine Heizwicklung, eine Wasserkühlung und eine Induktionswicklung — zusammen mit entsprechenden elektrisch und thermisch isolierenden Zwischenschichten — anzubringen; dies wurde, wie

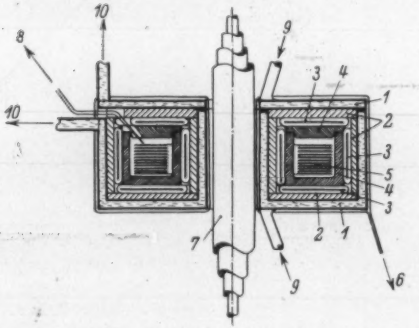


Fig. 1. Schnitt durch die Apparatur.

aus Fig. 1 ersichtlich, welche den Schnitt durch den Ofen darstellt, in folgender Weise erreicht. Die Probe, bestehend aus etwa 10 bis 20 Ringen von 0,3 mm Dicke, wurde in einem ringförmigen Trog aus Silikarbonmasse (Firma Haldenwanger, Spandau) mit eingefaßtem Deckel ([4] in Fig. 1) untergebracht, ein Material, das neben hoher Hitzebeständigkeit schlechte elektrische und relativ gute Wärmeleitfähigkeit aufweist. Um diesen Trog herum befinden sich die 4 Heizwicklungen (3), von denen die obere und untere als flache Ringe und die innere und äußere als Zylinder ausgebildet wurden. Als Unterlage für die Heizwicklungen dienten entsprechende Glimmerkörper, welche toroidisch mit 0,4 mm starkem Cekas-Draht bewickelt wurden. Der Widerstand jeder Heizspule beträgt etwa 100 Ohm; die Leistungsaufnahme beträgt z. B. bei einer Temperatur von 700° C etwa 450 Watt. Diese Anordnung der Heizwicklung schließt die Einwirkung von Streufeldern auf den Probekörper aus, was noch durch besondere Messungen nachgeprüft wurde. Um diese Heizwicklung herum wurde ein etwa 3 mm starker ringförmiger Asbestkasten (2) angebracht. Dieses ganze System befindet sich in einem wasserdurchflossenen Kupfermantel (1), der aus zwei Teilen besteht, einem ringförmigen Trog und dazugehörigem Deckel. Die Wasserzu- und -abführungen sind durch (9) und (10) bezeichnet. Durch sämtliche Schichten hindurch ragt ein Thermoelement (8) in den Heizraum hinein bis dicht auf die Probenoberfläche. Die Magnetisierungswicklung (7) besteht aus vier voneinander isolierten konzentrischen Messingrohren; bei einer Stromstärke von etwa 30 Amp. wird ein homogenes Feld von etwa 8 Oersted erzielt, eine Feldstärke, die schon

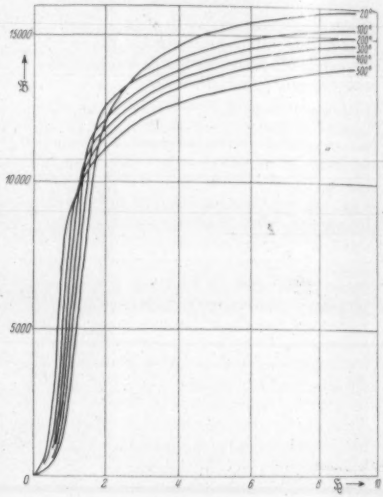


Fig. 2. Neukurven von Holzkohleneisen bei verschiedenen Temperaturen.

für die meisten Messungen ausreichend ist, erforderlichenfalls aber noch gesteigert werden kann.

Die Induktionswicklung (6) — je nach der Probe 20 bis 100 Windungen eines dünnen Kupferdrahtes — wurde isoliert um das Kühlgefäß gewickelt. Dies ist die einzige Wicklung, die jedesmal aufgebracht werden muß. Der Probenquerschnitt q beträgt etwa 0,2 bis 0,5 qcm, die Windungsfläche q' der Induktionsspule 16 qcm. Daraus ergibt sich ein Korrektionsfaktor für die Luftlinienkorrektion $\left(\frac{q'}{q} - 1\right) = 30$ bis 80, eine Größe, die auch für mittlere Permeabilitäten schon berücksichtigt werden muß. Der relative Fehler ist, wie der eine von uns[1]) gezeigt hat,

$$\frac{\bar{\mu} - \mu}{\mu} = \left(\frac{q'}{q} - 1\right) \cdot \frac{1}{\mu},$$

wenn $\bar{\mu}$ die unkorrigierte Permeabilität und μ die wahre Permeabilität bedeutet. Im ungünstig-

1) H. Neumann, l. c. S. 64.

sten Falle $\left[\text{für } \left(\frac{q'}{q} - 1\right) = 80\right]$ wird bei dieser Apparatur die prozentuale Abweichung

$$\left(\frac{\bar{\mu} - \mu}{\mu}\right) \cdot 100 = \frac{8000}{\mu},$$

also für

$\mu = 8000$ gleich 1 Proz,
$\mu = 800$ „ 10 „
$\mu = 80$ „ 100 „ usw.

Die Anordnung der Induktionswicklung über dem Kupfergefäß wurde deshalb gewählt, weil bei Anordnung innerhalb des Kühlgefäßes die Induktionswicklung mit erhitzt wird und infolgedessen thermoelektrische Störungen als Folge von Inhomogenitäten des Kupferdrahtes auftreten, die jede Messung unmöglich machen. Da der Deckel des Kühlgefäßes durch eine Lackschicht von dem inneren Teil isoliert ist, können beim Schalten des Primärstromes keine Kurzschlußströme im Kühlgefäß auftreten, die den zeitlichen Verlauf des Magnetisierungsimpulses verlangsamen und — besonders bei schnellschwingenden Galvanometern — die Meßresultate fälschen können.

Mit dieser Anordnung wurde eine Reihe von Messungen verschiedener Materialien ausgeführt, von denen hier nur eine Meßreihe an reinem Eisen wiedergegeben werden soll.

Das für die Versuche verwendete Holzkohleneisen wurde vorher eine Stunde bei 900° in

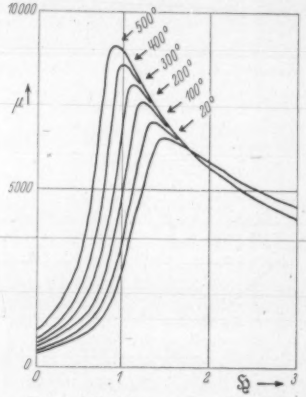


Fig. 3. Permeabilitätskurven von Holzkohleneisen bei verschiedenen Temperaturen.

Wasserstoff geglüht. Fig. 2 zeigt die Neukurven bei den Temperaturen 20, 100, 200, 300, 400 und

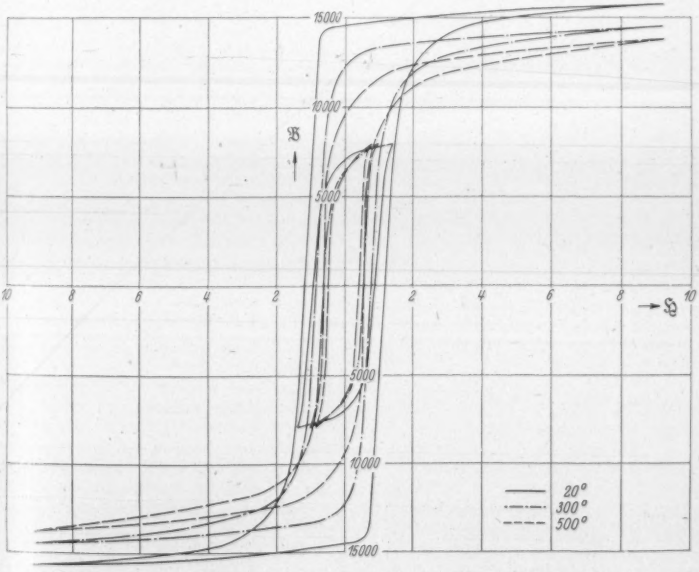


Fig. 4. Hystereseschleifen von Holzkohleneisen bei 20°, 300° und 500° C.

500°, die mit den aus der Literatur bekannten übereinstimmen. Je höher die Temperatur, desto stärker der Anstieg und um so niedriger die Sättigung. Fig. 3 zeigt die entsprechenden Permeabilitätskurven. Weiter wurden Hystereseschleifen von 100 zu 100° aufgenommen, von denen in Fig. 4 die Schleifen bei den Temperaturen 20°, 300° und 500° wiedergegeben sind, und zwar

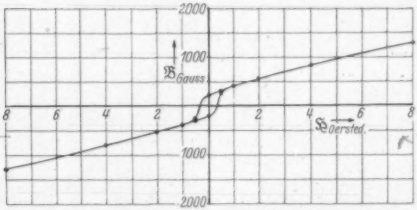


Fig. 5. Hystereseschleife von Holzkohleneisen dicht unterhalb des Curiepunktes.

je eine Schleife bei konstanter Induktion von $\mathfrak{B} = 8000$ Gauß und eine Schleife bei einem konstanten Feld von $\mathfrak{H} = 9{,}15$ Oersted. Hieran ist zu erkennen, daß mit steigender Temperatur einerseits die Koerzitivkraft abnimmt und andererseits sich auch die Form der Schleifen ändert. Die Schleifen gehen von einer annähernd rechteckigen in eine geschweifte Form über. Fig. 5 zeigt eine Schleife in der Nähe des Curiepunktes, aus der ersichtlich ist, daß hier hauptsächlich

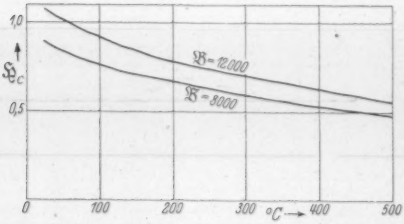


Fig. 6. Koerzitivkraft $\mathfrak{H}_c$ von Holzkohleneisen in Abhängigkeit von der Temperatur bei Induktionen von 8000 bzw. 12000 Gauß.

die Remanenz stark abgenommen hat. Weiter wurde die Abhängigkeit der Koerzitivkraft von der Temperatur bei Induktionen von 8000 bzw. 12000 Gauß untersucht; diese Abhängigkeit ist in Fig. 6 dargestellt. Fig. 7 zeigt den Hystereseverlust (in Watt pro Kilogramm) in Abhängigkeit von der Induktion bei verschiedenen Temperaturen. Der Hystereseverlust sinkt z. B. bei 12000 Gauß und 500° um 50 Proz. gegenüber Zimmertemperatur. Bei sämtlichen Kurven liegen die Meßpunkte innerhalb der Strichdicke.

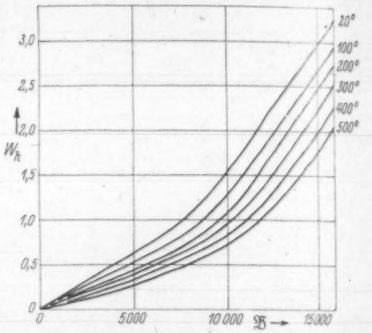


Fig. 7. Hystereseverluste W_h in Abhängigkeit von der Induktion bei Temperaturen von 20°, 100°, 200°, 300°, 400° und 500° C.

Weitere Versuchsergebnisse mit dieser Apparatur werden demnächst mitgeteilt.

Zusammenfassung.

Es wird eine Apparatur beschrieben, die es gestattet, auf einfache Weise an magnetischen Materialien bei höheren Temperaturen bis zum Curiepunkt exakte ballistische Ringmessungen auszuführen, was durch Angabe einer an Holzkohleneisen ausgeführten Meßreihe belegt wird.

(Eingegangen 9. Juli 1931.)

Reflexion der Röntgenstrahlen an dünnen Schichten.

Von E. Nähring.

Untersuchungen über die Totalreflexion der Röntgenstrahlen[1])[2]) haben gezeigt, daß diese in hohem Maße von dem Absorptionskoeffizienten des Spiegelmaterials abhängt. Die theoretische Behandlung dieser Frage von F. Jentzsch[3]) führte unter Zugrundelegung der Reflexionsformeln der Metalloptik zu einer einfachen Reflexionsformel für Röntgenstrahlen, die experimentell von E. Nähring[4]) an einem Silberspiegel

1) J. A. Prins, Zeitschr. f. Phys. **47**, 479, 1928.
2) R. Forster, Helv. Phys. Acta **1**, 18, 1928.
3) F. Jentzsch, Physik. Zeitschr. **30**, 268, 1929.
4) E. Nähring, Physik. Zeitschr. **31**, 799, 1930.

bestätigt worden konnte. Etwas später fand auch Thibaud[1], abgesehen von kleinen Änderungen, dieselbe Formel, die ihre experimentelle Bestätigung in den Versuchen von Dershem[2] und Edwards[3] fand.

Nachdem also gezeigt worden war, daß die Reflexion der Röntgenstrahlen nach der allen oben genannten Formeln zugrunde liegenden Fresnelschen Reflexionsformel verläuft, konnten mit Hilfe dieser Formel Dispersionsmessungen der Röntgenstrahlen gemacht werden. So wurde von E. Nähring[4] und H. Steps die Dispersion von Kupfer, Nickel und Gold und von H. Steps[5] die Dispersion von Aluminium in einem Wellenlängenbereich von 1,2—2,3 Å bestimmt. Bei diesen Untersuchungen benutzten Verff. massive Spiegel oder auch solche, die durch Reduktion des betreffenden Salzes auf eine Glasplatte niedergeschlagen waren. Es zeigte sich, daß solche Spiegel den theoretisch zu erwartenden Reflexionsverlauf ergaben.

Als sehr brauchbar haben sich auch die durch Kathodenzerstäubung hergestellten Spiegel erwiesen; siehe z. B. R. Forster[6]. Stauss[7] und Edwards[8] fanden aber in zahlreichen Untersuchungen, daß der Grenzwinkel der Totalreflexion solcher Spiegel sehr von der Dicke und Dichte der zerstäubten Schicht abhängt. Bei diesen Untersuchungen wurde größtenteils nur die Abhängigkeit des Grenzwinkels von der Dicke untersucht. In einem Falle hat Stauss auch das Reflexionsvermögen bei einigen Reflexionswinkeln untersucht. Er benutzte die relativ kurzwellige *Mo-K*-Strahlung, bei der das Reflexionsvermögen seiner Spiegel bis zur Grenze der Totalreflexion nahezu 100 Proz. beträgt, um dann schnell bis auf Null zu fallen. Es lassen sich somit wenig Aussagen über die Änderung des gesamten Reflexionsvermögens in Abhängigkeit von der Dicke machen. Mehr Erfolg versprechen für diese Frage Untersuchungen mit der langwelligeren *Cu-K*-Strahlung, bei welcher das Reflexionsvermögen eines Silberspiegels allmählich von dem Wert $R = 100$ Proz. bis Null absinkt. Das gesamte Reflexionsvermögen in Abhängigkeit von der Dicke der zerstäubten Schicht mit *Cu-K*-Strahlung zu messen, war Ziel vorliegender Arbeit.

1) J. Thibaud, Journ. de Phys. et le Radium (7) **1**, 37, 1930.
2) E. Dershem, Phys. Rev. **34**, 1015, 1929.
3) H. W. Edwards, Phys. Rev. **37**, 339, 1931.
4) Noch unveröffentlicht.
5) H. Steps, Naturw. **19**, 617, 1931.
6) R. Forster, Helv. Phys. Acta **1**, 18, 1928.
7) H. E. Stauß, Phys. Rev. **31**, 491, 1928. Phys. Rev. **34**, 1021, 1929.
8) H. W. Edwards, Phys. Rev. **30**, 91, 1927. Phys. Rev. **32**, 712, 1928.

Versuchsmethode.

Es wurde ebenso wie bei der Bestimmung der Dispersion an Kupfer, Nickel und Gold die photographische Methode gewählt, doch mit der Abänderung, daß hier nicht der Spiegel kontinuierlich in einem bestimmten Winkelbereich geschwenkt, sondern um einige Winkelminuten gedreht und dann in jeder Stellung 4 Minuten belichtet wurde. Dies hat den Vorteil, daß die gesamte Belichtungszeit nur rund 2 Stunden dauerte, während bei der kontinuierlichen Drehung Belichtungszeiten bis zu 10 Stunden nötig waren. Aus Gründen der Justierung und um zu erreichen, daß die kleinste noch reflektierte Intensität registriert wurde, mußte der Schwenkbereich größer gewählt werden, als er eigentlich erforderlich war, was eine unnötig lange Belichtungszeit zur Folge hatte. Da vorliegende Untersuchungen nur qualitativ orientierenden Charakter haben, so konnte auf Monochromatisierung mittels eines Kristalles verzichtet werden, und es wurde die *Cu*-Strahlung von 16,6 kV_{eff} und 20 mA durch Nickelfolie gefiltert. Spektroskopisch wurde festgestellt, daß die $Cu\text{-}K_\beta$-Strahlung praktisch ganz absorbiert wurde. Die Strahlung fiel durch zwei Spalte von 0,75 mm Breite und von 430 mm gegenseitiger Entfernung auf den Spiegel, der sich in 70 mm Entfernung vom zweiten Spalt befand. Im Abstand von 360 mm bzw. 718 mm vom Spiegel befand sich der photographische Film. Der Spiegel wurde jedesmal um rund eine Bogenminute gedreht und jede Stellung 4 Minuten belichtet. Jeder Versuch wurde 4mal wiederholt. So erhielt ich eine Reihe Linien, die die Spur der reflektierten Strahlen bei verschiedenen Winkelstellungen darstellten. Diese Aufnahmen wurden mit einem Hartmann-Photometer, einige auch mit dem Zeissschen Registrierphotometer[1] ausphotometriert. Die so gewonnenen Schwärzungswerte wurden dann unter Benutzung von Intensitätsskalen in Intensitätswerte umgerechnet und mit der Intensität des Primärstrahls verglichen, wodurch das gesuchte Reflexionsvermögen erhalten wurde.

Bei einer Betrachtung der Kurven 1—3 fällt auf, daß die Meßpunkte ziemlich streuen. Es ist aber bei der photographischen Bestimmung der Reflexionskurven nur schwer eine größere Genauigkeit zu erreichen. Auch Monochromatisieren mit einem Kristall, sehr kleine Spaltbreiten usw. erhöhen die Genauigkeit nicht wesentlich, wie Versuche von H. Steps und Verf. zeigten. Die verschiedene Empfindlichkeit der photographischen Platte, die Umrechnung der Schwärzungs-

1) Die Registrierung mit dem Zeissschen Registrierphotometer hatte freundlicherweise Herr H. Steps, Jena, übernommen, wofür ich ihm meinen verbindlichsten Dank ausspreche.

werte in Intensitäten, die photometrische Registrierung und die schwankende Intenstität der Röntgenlichtquelle bringen Fehler in die Rechnung. Wesentlich genauer ist die ionometrische Methode, die aber für qualitative Untersuchungen wie vorliegende zu umständlich und zeitraubend ist.

Resultate.

Es wurde das Reflexionsvermögen der Röntgenstrahlen zweier durch Kathodenzerstäubung hergestellter Silberspiegel und der als Unterlage dienenden Glasplatte untersucht. Die gemessenen Reflexionsvermögen sind in Abhängigkeit vom Winkel, in Bogen gemessen, in Fig. 1, Kurve *a*—*c*

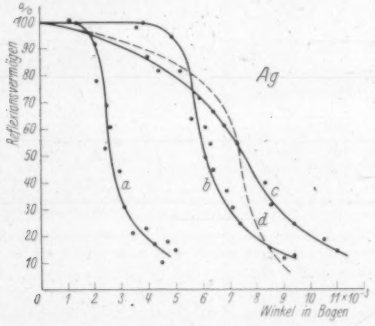


Fig. 1.

aufgetragen. Kurve *a* gibt das Reflexionsvermögen der Glasplatte wieder. Ihr Grenzwinkel der Totalreflexion ist klein, ebenso besitzt auch der Absorptionskoeffizient kleine Werte, was einen ziemlich steilen Abfall des Reflexionsvermögens an der Grenze der Totalreflexion zur Folge hat. Ein Spiegel, der in 3stündiger Zerstäubungsdauer hergestellt worden war, zeigt schon einen erheblich größeren Grenzwinkel der Totalreflexion, während der Absorptionskoeffizient sich nicht wesentlich geändert hat; siehe Kurve *b*. Ein in 5stündiger Zerstäubungsdauer hergestellter Spiegel gibt ungefähr das Reflexionsvermögen einer dicken Silberschicht. Die Kurve zeigt keine 100proz. Reflexion mehr, der Absorptionskoeffizient ist größer geworden, weshalb die Reflexionskurve flacher verläuft als die Kurven *a* und *b*. Zum Vergleich ist die theoretische, aus dem bekannten Brechungsindex und Absorptionskoeffizienten berechnete Kurve *d* aufgetragen. Sie verläuft steiler als die experimentell bestimmte Kurve *c*. Dies erweckt den Anschein, als ob der Absorptionskoeffizient der Kurve *c* größer sei als der der Kurve *d*. Da ich mit relativ großer Spaltbreite gearbeitet habe, und da die ionometrische Bestimmung des Reflexionsvermögens des Silberspiegels Übereinstimmung zwischen den experimentellen und theoretischen Werten ergeben hat, so ist dieser flache Verlauf der Kurve *c* der großen Spaltbreite zuzuschreiben. Vorversuche zu meiner Arbeit über die Prüfung der Jentzschschen Formel haben gezeigt, daß eine Vergrößerung der Spaltbreite über 0,08 mm die Reflexionskurve verflacht. Ebenso werden demzufolge bei kleinerer Spaltbreite auch die Kurven *a* und *b* steiler verlaufen.

Nach vorliegender Messung sind die Untersuchungen von Stauss und Edwards auch hinsichtlich des gesamten Reflexionsvermögens bestätigt, wonach δ, die Abweichung des Brechungsindex von eins, und der Absorptionskoeffizient der durch Kathodenzerstäubung hergestellten Spiegel mit der Schichtdicke variieren.

Weiter zeigt sich, daß das Reflexionsvermögen der Röntgenstrahlen an dünnen Schichten bei kleinen Winkeln größer ist als für dicke Schichten. Diese Tatsache ist im Hinblick auf das Reflexionsvermögen des gewöhnlichen Lichtes an dünnen Schichten überraschend. Aus der Form der Reflexionskurve muß man schließen, daß der Absorptionsindex in der dünnen Schicht kleiner ist als in der dicken Schicht, woraus sich nach der Jentzschschen Formel auch theoretisch ergibt, daß bei kleinen Winkeln das Reflexionsvermögen beinahe 100 proz. ist; zum Vergleich siehe Fig. 2 meiner Arbeit[1]), wo das Reflexionsvermögen für verschiedene Absorptionen aufgetragen ist. Eine

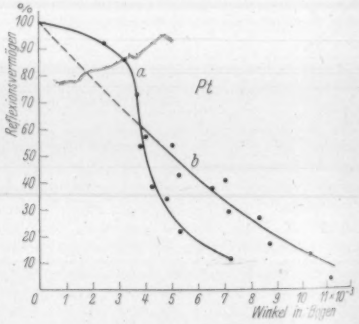


Fig. 2.

ins Einzelne gehende Erklärung der Abhängigkeit des Brechungsindex und des Absorptionskoeffizienten von der Dicke der zerstäubten Schicht läßt sich aus diesen Versuchen nicht geben; erst umfangreiche Untersuchungen werden darüber Aufschluß geben können. Besonders

1) E. Nähring, Physik. Zeitschr. 31, 799, 1930.

wird untersucht werden müssen, ob sich die Dichte der einzelnen zerstäubten Partikel geändert hat und die zerstäubte Schicht homogen ist, oder ob die Dichte der Partikel konstant geblieben ist und die Schicht inhomogen ist. Versuche in dieser Richtung werden fortgesetzt.

Es wurde auch das Reflexionsvermögen eines dünnen Platinspiegels bestimmt. Hier ergab sich die Kurve *a* in Fig. 2. Es zeigte sich wie bei Silber eine steile Reflexionskurve, die schon bei einem Winkel von etwa $3 \cdot 10^{-3}$, in Bogen gemessen, steil abfällt. Auch ist der Grenzwinkel der sog. Totalreflexion kleiner als der des massiven Platins und nur wenig größer als der des Glases, was mit der kleinen Schichtdicke der zerstäubten Schicht im Einklang ist. Ein anderer dünner Platinspiegel zeigt einen ganz anderen Verlauf, Fig. 2, Kurve *b*. Bei der dünnen Schichtdicke hätte man auch hier eine ähnliche Kurve wie *a* erwarten müssen; selbst eine dicke Schicht ergibt nicht ein solches Reflexionsvermögen, wie es vorliegende Kurve *b* zeigt. Es muß daher ein anderer Umstand als die Schichtdicke das Reflexionsvermögen verändert haben.

Es zeigte sich, daß die Oberfläche des Spiegels nicht ganz einwandfrei war. Infolge von Fettdämpfen in der Zerstäubungsapparatur war die Oberfläche fleckig geworden, und die Güte der Politur schien gelitten zu haben. Um Aufschluß darüber zu erhalten, ob die Politur des

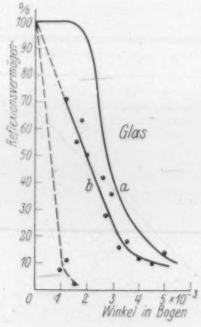


Fig. 3.

Spiegels einen solchen Einfluß auf das Reflexionsvermögen hat, wurde die Oberfläche einer Glasplatte mit Ammoniumfluoridlösung behandelt und so aufgerauht. Ihr Reflexionsvermögen zeigt Kurve *c* in Fig. 3. Trotzdem optisch noch keine Verschlechterung der Politur festzustellen war, ist das Reflexionsvermögen für Röntgenstrahlen durch die chemische Einwirkung der Lösung ein anderes geworden. Auch hier läßt sich durch die Meßpunkte ebenso wie bei Platin eine Gerade von $R = 100$ Proz. bis $R = 20$ Proz. zeichnen. Das Reflexionsvermögen fällt schon bei kleinen Winkeln steil ab. Bei den Meßpunkten *c* ist die Ungenauigkeit so groß, daß sich keine eindeutigen Aussagen darüber machen lassen; vermutlich wird das Reflexionsvermögen so verlaufen, wie es gestrichelt eingezeichnet ist. Die Glasplatte, deren Reflexionsvermögen die Kurve *c* ergibt, wurde mehrere Stunden mit der Ammoniumfluoridlösung behandelt, während die Glasplatte mit der Reflexionskurve *b* nur eine halbe Stunde in der Lösung lag. Kurve *a* zeigt wieder das Reflexionsvermögen der unbehandelten Platte.

Zusammen mit der Verminderung des Reflexionsvermögens bei abnehmender Politur geht eine Verbreiterung der reflektierten Linien. Bei Kurve *c* waren diese schon ganz breit und verwaschen. Bemerkenswert ist auch, daß die allgemeine Schwärzung neben den reflektierten Linien mit abnehmender Politur stark zunimmt.

Die Versuche an den chemisch behandelten Glasplatten lassen daher den Schluß zu, daß die mangelhafte Güte der Politur des Platinspiegels für die Kurve *b* der Fig. 2 verantwortlich zu machen ist.

Zusammenfassung.

Das Reflexionsvermögen der Röntgenstrahlen dünner durch Kathodenzerstäubung hergestellter Silber- und Platinspiegel wird in Abhängigkeit vom Reflexionswinkel untersucht. Es ergibt sich, daß bei kleinen Reflexionswinkeln das Reflexionsvermögen dünner Schichten größer ist als das der dicken Schichten, weshalb man, um bei kleinen Winkeln möglichst große Reflexion zu erhalten, die Schichtdicke dünn wählen muß. Andererseits aber zeigt sich, daß für die Bestimmung der Dispersion der Röntgenstrahlen aus der Totalreflexion kathodenzerstäubter Spiegel nur hinreichend dicke Schichten den Brechungsindex des massiven Metalles ergeben.

Der Einfluß der Politur auf das Reflexionsvermögen wird an Glas untersucht, wobei sich ergibt, daß durch Verschlechterung der Politur das Reflexionsvermögen bedeutend herabgesetzt wird.

Diese Untersuchung wurde im Physikalischen Institut der Universität Greifswald ausgeführt. Es ist mir eine angenehme Pflicht, Herrn Prof. Dr. F. Krüger, der mir diese Untersuchung ermöglichte und sie in jeder Weise förderte, meinen ergebensten Dank auszusprechen.

Greifswald, Physikalisches Institut der Universität, Juli 1931.

(Eingegangen 24. Juli 1931.)

Vorführungsversuche über die Lichtabsorption in einfachen Kristallen.

(Vorgetragen in der Sitzung des Niedersächsischen Gauvereins der Deutschen Physikalischen Gesellschaft am 12. Juli 1931.)

Von R. Hilsch und R. W. Pohl.

Die großen Fortschritte der Optik in den letzten Jahrzehnten beruhen ganz überwiegend auf der Untersuchung von Gasen und Dämpfen. So beherrscht man z. B. den Mechanismus der Lichtabsorption in weitestem Maße für einatomige Gase. In mehratomigen Molekülen liegen die Dinge schon erheblich komplizierter, aber auch bei ihnen weiß man schon in zahlreichen Fällen vorzüglich Bescheid.

Verglichen mit Gasen und Dämpfen ist die Lichtabsorption in festen Körpern praktisch völlig vernachlässigt worden. Die Verhältnisse galten als hoffnungslos kompliziert. Trotz dieses allgemeinen Pessimismus haben wir uns hier im Institut schon seit Jahren mit der Lichtabsorption in festen Körpern beschäftigt, immer in der Hoffnung, schließlich doch noch auf einfache Verhältnisse zu stoßen. Wir hofften, durch einen glücklichen Griff geeignete Substanzen herauszufinden, die typische Erscheinungen im Sinne einfacher Grenzfälle zeigen.

Diese einfachen und typischen Grenzfälle haben wir bei den Alkalihalogenidkristallen gefunden und wir möchten Ihnen heute aus dem Bereich dieser Untersuchungen drei Einzelergebnisse experimentell vorführen. Die Fig. 1 zeigt

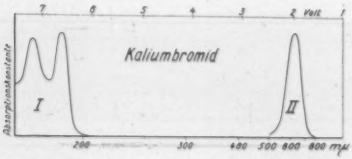


Fig. 1. Absorptionsspektrum eines KBr-Kristalles (I, Absorptionskonstanten in der Größenordnung 10^{5} mm^{-1}) und seines photochemischen Reaktionsproduktes (latentes Bild, II, Absorptionskonstanten in der Größenordnung 10^{-2} mm^{-1}). Zimmertemperatur.

die beiden ersten ultravioletten Energiestufen eines KBr-Kristalles, zwei scharfe Banden bei 173 und 188 mμ. Diese Banden sind in sehr dünnen Kristallschichten durch direkte lichtelektrische Photometrie ausgemessen worden (1). Die Lichtabsorption in diesen Banden führt unter allen Umständen zu einer photochemischen Reaktion, es geht ein Elektron vom Anion zum Kation, das Ergebnis ist ein photochemisches Reaktionsprodukt (2). Dies Reaktionsprodukt besitzt die im Sichtbaren gelegene Bande II. Im Prinzip wird der Kristall verfärbt und deswegen benutzen wir für das Reaktionsprodukt oft den indifferenten Namen Farbzentrum.

Die Konzentration dieser Farbzentren ist in der Mehrzahl der Fälle minimal. Dann entsteht die gleiche Schwierigkeit wie beim latenten Bilde der Photographie (3): Die primäre photochemische Wirkung des Lichtes ist vollständig unsichtbar. In der Photographie haben wir zum Nachweis derartiger latenter Lichtwirkungen das Hilfsmittel der chemischen Entwicklung. Für unsere Alkalihalogenidkristalle besitzen wir einen noch überlegenen Nachweis, nämlich einen elektrischen (4).

Denken Sie sich einen Kristall zwischen zwei Elektroden in einen Stromkreis geschaltet: Der Vorgang der Verfärbung, der Aufbau des latenten Bildes, ist elektrisch nicht nachweisbar. Denn das Elektron geht von einem Anion zum direkt benachbarten Kation und verwandelt dies in ein neutrales Alkaliatom, selbstverständlich in irgendwelcher Gitterbindung.

Aber die Lichtabsorption in den Farbzentren oder Alkaliatomen führt zur Abspaltung freier Elektronen. Jedes Lichtquant liefert ein freies Elektron und dies führt im Endergebnis zur Wiederherstellung eines Zentrums der Bande I. Bei diesem Vorgang läuft das Elektron etliche Zehntel μ durch das Kristallgitter hindurch und das ist ohne weiteres als elektrischer Strom nachweisbar (5).

Zur praktischen Ausführung dieses Versuches nehmen wir einen KBr-Kristall von 5 × 15 × 50 mm Größe. Seine beiden Breitseiten sind mit

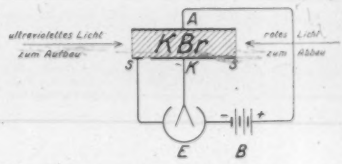


Fig. 2. Versuchsanordnung zum elektrischen Nachweis der latenten Lichtwirkung. S = Schutzringelektrode.

aufgedampften Goldelektroden versehen (Fig. 2). Von der einen Elektrode ist ein 5 mm breiter Schutzring abgetrennt. Von links kommt das photochemisch wirksame oder verfärbende Licht. Es rührt von einer kleinen Funkenstrecke aus etwa 20 cm Abstand her. Die Belichtungszeit wählen wir etwa $^1/_5$ Sekunde. Dabei werden etwa $2 \cdot 10^{12}$ Lichtquanten im Kristall absorbiert. Diese Zahl haben wir zuvor durch geeignete Differenzmessungen mit der Thermosäule er-

mittelt. Während dieser Einstrahlungszeit von etwa $^1/_5$ Sekunde Dauer bleibt das Elektrometer praktisch in Ruhe. Man sieht höchstens eine kleine Zuckung des Fadens, herrührend von unvollkommenem statischen Schutz gegenüber den elektrischen Schwingungen der Funkenstrecke. Jetzt kommt der eigentliche Versuch: Die Zerstörung der latenten Lichtwirkung und die sie begleitende Elektrizitätsbewegung. Wir lassen von rechts das rote Licht einer Bogenlampe einfallen, ausgeblendet durch ein

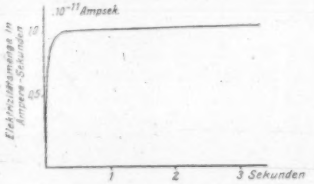


Fig. 3. Elektrizitätsbewegung bei der Zerstörung der latenten Lichtwirkung. Die schwache, auch nach einer Sekunde noch fortschreitende Aufladung des Elektrometers rührt von gleichzeitigem Aufbau und Abbau der latenten Lichtwirkung durch rotes Licht her.

bei 550 $\mu\mu$ abschneidendes Glasfilter. Das Elektrometer zeigt einen jäh ansteigenden und im Bruchteil einer Sekunde praktisch zur Ruhe kommenden Ausschlag, vgl. Fig. 3.

Die beobachtete Elektrizitätsmenge beträgt etwa 10^{-11} Ampere-Sekunden und daher genügt schon das relativ unempfindliche Einfaden-Voltmeter. Dieser elektrische Nachweis der latenten Lichtwirkung ist außerordentlich empfindlich. In dem gezeigten Beispiel entfiel ein absorbiertes Lichtquantum und somit ein photochemisches Reaktionsprodukt auf rund $3 \cdot 10^{10}$ *KBr*-Moleküle. Bei der normalen Belichtung einer photographischen Platte haben wir als entsprechendes Zahlenverhältnis $1 : 2 \cdot 10^7$ (6). Die Konzentration der Farbzentren oder der photochemischen Reaktionsprodukte der latenten Lichtwirkung war also rund drei Zehnerpotenzen kleiner als bei einer normal belichteten photographischen Platte. Das war der erste Versuch. Man kann die latente Lichtwirkung oder das latente Bild bei seiner Zerstörung elektrisch nachweisen und dieser Nachweis ist von größter Empfindlichkeit.

Der zweite Versuch soll jetzt eine Anwendung dieses elektrischen Nachweises der latenten Lichtwirkung bringen. Wir sehen in Fig. 1 das Absorptionsspektrum des *KBr* praktisch bei 210 mμ abbrechen. In Wirklichkeit läuft jedoch das Absorptionsspektrum asymptotisch in Richtung längerer Wellen aus. Auch das weiße Licht einer Bogenlampe hinter einer Glasoptik wird noch in meßbarer Weise absorbiert. Wir sehen im weißen Bogenlicht durch den *KBr*-Kristall einen dauernden Strom fließen, und zwar etwa $2 \cdot 10^{-11}$ Ampere. Der kurzwellige Teil des weißen Lichtes wird absorbiert und baut ein latentes Bild auf, der rote Teil des weißen Lichtes wird in der bei 630 mμ gelegenen Bande absorbiert. Er zerstört das latente Bild und liefert die beobachteten Elektronen. Die Lichtabsorption im Gebiet dieser längeren Wellen, also im nahen Ultraviolett und im Sichtbaren ist außerordentlich gering. Es findet nur ganz selten ein Absorptionsakt statt. Tritt er aber ein, so ist er immer ein photographischer Elementarprozeß. Wir haben auf diese Weise die Größenordnung der Lichtabsorption quantitativ messen können. Sie ist sehr gering. So wird z. B. violettes Licht erst in 5 km Kristalldicke zur Hälfte absorbiert (5).

Dieser Versuch kann auch noch in einer andern Weise gedeutet werden. Bisher hielt man latente Bilder für ein Spezifikum der Silbersalze. Jetzt sehen wir, daß latente Bilder genau so gut in Alkalihalogenidkristallen auftreten. Ein Kochsalzkristall ist im Grunde genau so lichtempfindlich wie eine photographische Platte. Sehr kurze Zeit in Tageslicht gebracht, enthält er eine latente Lichtwirkung, gekennzeichnet durch eine schwache, bei 460 mμ gelegene Absorptionsbande. Durch den Antagonismus der kurzen Wellen und der vom latenten Bild absorbierten Strahlung erreicht diese latente Lichtwirkung nie erhebliche Konzentrationen. Wir haben, photographisch gesprochen, stets mit einem starken Herscheieffekt zu rechnen, d. h. mit einer Zerstörung des latenten Bildes durch die längeren Wellen des Lichtgemisches. Dem elektrischen Nachweis entgehen aber auch diese schwachen Konzentrationen der Lichtwirkung nicht. An letzter Stelle wiederholen wir noch einmal die Einstrahlung des weißen Bogenlampenlichtes hinter Glasoptik und beobachten noch einmal einen dauernd durch den *KBr*-Kristall fließenden Strom: Bisher hielt man lichtelektrische Ströme in Kristallen für eine Sondereigenschaft von Selen und andern Kristallen mit hohem Brechungsindex (7). Jetzt erweisen sie sich als eine Begleiterscheinung des Lichtabsorptionsvorganges schon in den einfachsten Kristallen, den Ionengittern der Alkalihalogenide.

Diese Beispiele müssen genügen. Sie sollen nur andeuten, in welcher Richtung sich zur Zeit die Arbeiten des Institutes bewegen.

Literatur.

1) R. Hilsch und R. W. Pohl, Zeitschr. f. Phys. **57**, 145, 1929; **59**, 812, 1930.

2) A. Smakula, Zeitschr. f. Phys. **63**, 762, 1930; E. Mollwo, Gött. Nachr. 97, 1931.
3) R. Hilsch und R. W. Pohl, Gött. Nachr. Math.-Phys. Kl. 177, 1930.
4) R. Hilsch und R. W. Pohl, Gött. Nachr. Math.-Phys. Kl. 334, 1930.
5) R. Hilsch und R. W. Pohl, Zeitschr. f. Phys. **68**, 721, 1931.
6) R. Hilsch und R. W. Pohl, Zeitschr. f. Phys. **64**, 606, 1930.
7) B. Gudden und R. W. Pohl, Zeitschr. f. Phys. **16**, 42, 1923.

Göttingen, I. Physikalisches Institut der Universität, Juli 1931.

(Eingegangen 5. August 1931.)

BESPRECHUNGEN.

Rudolf Beyer, Technische Kinematik. Zwanglaufmechanik nebst Bewegungsgeometrie und Dynamik der Getriebe in Theorie und Praxis. Zum Gebrauche bei Vorlesungen, in Konstruktionssälen und beim Selbststudium. XII, 504 S., mit einem Bildnis von Franz Reuleaux und 642 Figuren im Text. Leipzig 1931. J. A. Barth. Gr.-8°. Preis RM 50.—, geb. RM 53.—.

Die Kinematik als Maschinengetriebelehre ist von Reuleaux entwickelt worden (1875). Seine systematische Lehre von den Getriebetypen ließ aber die wichtige Frage nach der Ermittlung der Abmessungen unbeantwortet. Seither hat sich die Kinematik im wesentlichen in geometrischer Beziehung entwickelt (zuerst von Burmester, 1888). Durch die Einführung von Maschinen mit direkt rotierender Bewegung (Dampfturbinen, Turbopumpen und Gebläse, elektrische Maschinen) hat die Kinematik an praktischer Bedeutung verloren. Erst durch die systematischen Untersuchungen von F. Wittenbauer über die Kraft- und Massenwirkungen (Graphische Dynamik, 1923) hat die Getriebelehre von neuem eine für den Ingenieur wichtige praktische Ergänzung erhalten. Die Bedeutung der Kinematik und das Interesse dafür als grundlegende Wissenschaft für viele Zweige der Maschinentechnik ist durch die Entwicklung der Arbeitsmaschinen und durch die Erhöhung der Drehzahlen der Kolbenkraftmaschinen wesentlich gesteigert worden.

Das vorliegende Lehrbuch ist im Geiste und im Sinne der drei obengenannten hervorragenden Kinematiker geschrieben. Es verdient eine weite Verbreitung. Leider läßt der Umfang und dadurch auch der hohe Preis des Buches befürchten, daß es in Ingenieurkreisen nicht die allgemeine Aufnahme finden wird, auf die es unbedingt Anspruch hat.

ten Bosch.

F. Baldet, La constitution des comètes. G.-8°. 23 S., 2 Fig., 1 Tafel. Paris 1930. Librairie Scientifique Hermann et Cie. Fr. 5.—.

Der Verfasser dieses populär-wissenschaftlichen Vortrags hat in den letzten Jahren durch gründliche Arbeiten zum Kometenproblem beigetragen (Termanalyse der Spektralbanden von Kopf, Kern und Schweif eines Kometen u. a.). Geboten wird hier eine Übersicht über das durch Beobachtung Erreichte und vorsichtig über die zugehörigen Hypothesen, Strahlungsdruck (Schwarzschild, Baade, Pauli, Unsöld), Kathodenlumineszenz, Fluoreszenz u. a. berichtet.

Hopmann.

Tagesereignisse.

Bezug für Fortdrucke des Ausschusses für Einheiten und Formelgrößen. Es ist häufig darüber geklagt worden, daß es sehr umständlich sei, die in der ETZ verstreuten Veröffentlichungen des AEF zu verfolgen. Es soll daher in Zukunft die Möglichkeit gegeben werden, „Fortdrucke" (verbilligte Sonderdrucke) der Veröffentlichungen unentgeltlich zu beziehen. Wer an dieser Einrichtung teilnehmen will, gebe der Geschäftsstelle Berlin W 35, Potsdamer Str. 118 a II, Nachricht. Er erhält dann ohne weiteren Schriftwechsel Fortdrucke sämtlicher neu erscheinenden Veröffentlichungen.

Die Internationale elektrotechnische Kommission wird im Jahre 1932 in Paris einen **Elektriker-Kongreß** veranstalten. Für Auskünfte und Rückfragen ist der IEC, Berlin W 57, Potsdamer Str. 68 zuständig.

Personalien.

(Der Herausgeber bittet die Herren Fachgenossen, der Schriftleitung von eintretenden Änderungen möglichst bald Mitteilung zu machen.)

Habilitiert: An der Universität Köln Dr. Hubert Cremer für Mathematik und mathematische Behandlung der Physik, an der Technischen Hochschule Hannover Dr. Otto Flachsbart für Hydro- und Aerochemie, an der Universität Jena der bisherige Privatdozent an der Universität Köln Dr. Max Müller für Geophysik.

Ernannt: Der Assistent am chemischen Laboratorium der Universität Kopenhagen Dr. I. A. Christiansen zum Dozenten für Chemie daselbst, Dr. Ing. Karl H. Sandved zum Dozenten für physikalische und Elektrochemie an der Technischen Hochschule in Trondheim (Norwegen), der Professor der Physik an der Panjab Universität in Lahore Dr. B. Dasannacharya zum ord. Professor der Physik an der Hindu Universität in Benares (Indien), der Privatdozent an der Universität Göttingen Dr. Udo Wegner zum ord. Professor der Mathematik an der Technischen Hochschule Darmstadt.

Ehrung: Zum Rektor der Universität Hamburg für Oktober 1931 bis 1932 wurde der ord. Professor der Meteorologie Dr. Albert Wigand, Direktor des Meteorologischen Instituts, gewählt.

Gestorben: Der ord. Professor der Technischen Chemie an der Chemisch-Technischen Hochschule Prag Ing. Dr. Karl Andrlik, der frühere Dozent für Chemie am Viktoria College in Stellenbosch (Südafrika) Professor Dr. Rudolf Marloch, der Professor für Chemical Engineering am Imperial College of Science and Technology I. W. Hinchley in London.

Berichtigung zu den Personalien S. 600: Der Name Seelkopf muß richtig lauten: Professor Dr. Heinrich Seilkopf.

Für die Schriftleitung verantwortlich Prof. Dr. P. Debye in Leipzig. — Verlag von S. Hirzel in Leipzig.
Druck von August Pries in Leipzig.